بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

بررسی جریان تاریک سلولهای خورشیدی بر پایه‌ی گالیم نیترید با در نظر گرفتن بازترکیب اوژه و شاکلی – رید –هال

مینا پیرعلائی[۱و۲]، مینا هلالی[۳] و اصغر عسگری[۱]

۱. گروه فوتونیک، پژوهشکده فیزیک کاربردی و ستاره شناسی دانشگاه تبریز، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۲. گروه فوتونیک، پردیس بین المللی ارس دانشگاه تبریز،دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۳. گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور ارومیه، ارومیه ، ایران.

چکیده – در این مقاله جریان اشباع تاریک سلولهای خورشیدی پیوندی گالیم نیتریدی با در نظر گرفتن دو نوع از مهمترین بازترکیب های ممکن شامل باز ترکیب اوژه و باز ترکیب شاکلی – رید –هال بررسی شده است. بدین منظور با محاسبه ی نرخ تولید و بازترکیب خالص ساختار سلول خورشیدی پیوندی گالیم نیتریدی تحت تابش نور و استفاده از آن در معادله چگالی حاملین اقلیت و پیوستگی جریان ، عبارتی برای چگالی حاملین اقلیت در ناحیه بیس بدست آمده است. همچنین وابستگی چگالی حاملین اقلیت و چگالی جریان تاریک به عوامل مختلفی همچون میزان آلایش نیمرسانای بیس، پهنای بیس و ... نیز بررسی شده است.

کلید واژه- سلول خورشیدی- جریان اشباع تاریک- حاملین اقلیت.

The investigation of the dark saturation current of GaN solar cells considering both Auger and SRH recombinations

Mina piralaie[1,2] , Mina Helali[3], Asghar Asgari[1]

1. Photonics group, Research Institute for applied physics and astronomy, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

2. Photonics group, Aras International Campus of University of Tabriz, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

3. Physics group, Urmia Payam Nour University. Urmia, Iran.

Abstract- In this paper the dark saturation current of p-n junction GaN solar cells with assuming two important types of recombination including Shockley-Read- Hall and Auger recombinations has been investigated. For this aim, with calculating the rate of net recombination of a p-n junction GaN solar cell under illumination and using of it in the minority carriers and continuity equations, an expression for the minority carrier's concentration in the base region has been obtained. Also the dependence of the dark saturation current density on different parameters such as dopancee of the base, the width of the base and etc. has been investigated.

Keywords: solar cell, dark saturation current, minority carriers.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

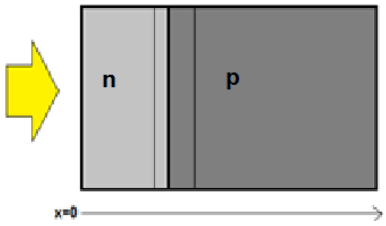
[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-02]

۱- مقدمه

با توجه به بحران انرژی و گرم تر شدن زمین، علاقه به انرژی خورشیدی به عنوان جایگزینی برای سوخت های فسیلی افزایش یافته است. یک راه استفاده از انرژی خورشیدی، سلول های خورشیدی می باشد. سلولهای خورشیدی پیوند p-n از مواد نیمرسانای مختلفی از جمله سیلیکون ساخته می شوند. در میان مواد نیمرسانای مختلف، گالیم نیترید بدلیل خواص ویژه آن مانند گاف باندی پهن، جرم موثر پایین حاملین، تحرک پذیری و سرعت اشباع بالا کاندیدای مناسبی برای ساخت سلولهای خورشیدی می باشد. [۱] جریان تاریک یکی از پارامتر های مهم سلولهای خورشیدی است چراکه اثر منفی روی مشخصه ی جریان- ولتاژ سلول خورشیدی دارد. پدیده بازترکیب عامل اصلی محدود کننده ی بازده سلول های خورشیدی تک پیوندی است که بر روی جریان تاریک سلول نیز تاثیر گذار است[۲]. بازترکیب می تواند به دو صورت نوری و غیر نوری در یک سلول رخ دهد. در حالت غیر نوری نور جذب شده به صورت گرما تلف می شود. دو حالت ممکن از بازترکیب غیر نوری، بازترکیب شاکلی- رید- هال و باز ترکیب اوژه هستند. باترکیب شاکلی- رید- هال، بازترکیب بوسیله ترازهای تله یا ناخالصی یا ایرادهای ساختاری می باشد که فقط در ساختارهای خیلی خالص و بدون ایراد اتفاق نمی افتد، بنابراین برای ساختارهای معمول مورد استفاده که هم نیمرساناهای مورد استفاده آلاییده هستند و هم نمی توان ناخالصی ها را نادیده گرفت، بررسی نقش این نوع از بازترکیب ضروری به نظر می رسد. بازترکیب اوژه نوعی بازترکیب است که طی آن سه حامل بار درگیر می شوند یعنی یک الکترون و یک حفره بازترکیب می شوند، اما انرژی خود را به صورت گسیل فوتون یا گرما آزاد نمیکنند، بلکه انرژی خود را به یک الکترون یا حفره ی دیگر می دهند [۳]. در این مقاله تاثیر این دو نوع بازترکیب بر روی جریان تاریک سلولهای خورشیدی پیوند p-n گالیم نیترید در شرایط مختلف بررسی شده است.

۲- مدل بندی

در یک سلول خورشیدی پیوند p-n ، که بیس از نوع نیمرسانای نوع n باشد، برای محاسبه غلظت حامل های اقلیت از معادلات چگالی جریان حفره استفاده می شود.



شکل ۱- ساختار شماتیک سلول خورشیدی پیوند p-n

چگالی جریان حفره های اقلیت در بیس مجموع چگالی جریان پخشی و چگالی جریان سوقی حفره ها می باشد:

$$J_p = qp(x)\mu_p(x)E(x) - qD_p(x)\frac{dp(x)}{dx} \qquad (1)$$

که در آن q بار الکترون ، $\mu_p(x)$ تحرک پذیری حفره در هر نقطه و $D_p(x)$ ثابت پخش حفره در هر نقطه، $p(x)$ تراکم حفره در هر نقطه و $E(x)$ میدان در هر نقطه از بیس می باشد[۴]. همچنین در بیس خنثی چگالی جریان الکترون اکثریت صفر فرض می باشد یعنی : $J_n = 0$

معادله ی (۱) را می توان به صورت معادله دیفرانسیل مرتبه اول مرتب کرد.

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{J_p}{qD_p(x)} + P(x)\frac{E(x)}{V(x)} \qquad (2)$$

برای محاسبه ی طول عمر موثر حفره ها نرخ بازترکیب خالص را برای هر دو مورد بازترکیب شاکلی- رید – هال و اوژه بصورت زیر محاسبه شده است: الف. نرخ بازترکیب خالص برای بازترکیب شاکلی- رید – هال بصورت زیر تعریف می شود:

$$(R-G)_{SRH} = \frac{p}{\tau_{p,SRH}}$$

که در آن $\tau_{p,SRH}$ طول عمر حفره ناشی از بازترکیب شاکلی- رید- هال است و بصورت زیر تعریف می شود:

$$\tau_{p,SRH} = \frac{\tau_{p0}}{1+\frac{N_d}{N_{ref}}}$$

ب. نرخ بازترکیب خالص برای بازترکیب اوژه بصورت زیر تعریف می شود:

$$(R-G)_A = C_A N_d^2 p$$

که در آن C_A ثابت بازترکیب اوژه بوده و بصورت زیر تعریف می شود:

$$C_A = 0.67\times10^{-31} + 8.16\times10^{-34}T - 2.44\times10^{-37}T^2$$

و نرخ بازترکیب کل مجموع نرخ بازترکیب شاکلی – رید – هال و اوژه می باشد[۴]

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-02]

$$R-G=[\frac{1+\frac{N_d}{N_{ref}}}{\tau_{p0}}+C_A N_d^2]\times p \qquad (3)$$

$$R-G=\frac{p}{\tau_p} \qquad (4)$$

$$(3),(4)\Rightarrow \frac{1}{\tau_p}=\frac{1+\frac{N_d}{N_{ref}}}{\tau_{p0}}+C_A N_d^2 \qquad (5)$$

بنابراین معادله پیوستگی جریان برای حفره ها بصورت زیر نوشته می شود:

$$\frac{dJ}{dx}=-q(R-G)=\frac{-qp}{\tau_p} \qquad (6)$$

و با استفاده از روابط زیر که برای تزریق تراز پایین معتبر می باشند:

$$\frac{E}{V_T}=-\frac{\eta}{W}(1-\wp_2) \qquad (7)$$

$$D_p=D_p(0)[\frac{N_{ref}}{N_d(0)}]^{\wp_3}u^{-\wp_3} \qquad (8)$$

که W پهنای ناحیه ی تهی، $N_d(W)$ و $N_d(0)$ چگالی دوپینگ به ترتیب در $x=0$ و $x=W$ و $\eta=\log\left[\frac{N_d(W)}{N_d(0)}\right]$ شیب لگاریتمی پروفایل دوپینگ است. τ_p طول عمر مؤثر حفره و C ضریب بازترکیب با در نظر گرفتن دو نوع بازترکیب شاکلی – رید – هال و اوژه و $\wp_2=0.5323$ و $\wp_3=0.38$ است، با مشتق گیری از رابطه ی (۲) و استفاده از روابط (8)–(7) خواهیم داشت:

$$\frac{d^2p}{dx^2}+[(1-\wp_2-\wp_3)\frac{\eta}{W}]\frac{dp}{dx}-$$

$$[CFu^{k+\wp_3}+\frac{\eta^2}{W^2}\wp_3(1-\wp_2)]p=0 \qquad (9)$$

جواب معادله بدست آمده به صورت ترکیبی از توابع اصلاح شده بسل نوع اول و دوم نوشته شده است[۵].

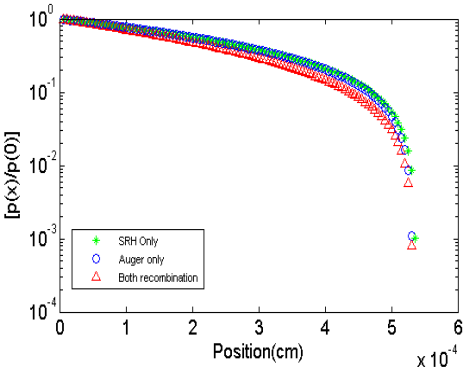
$$P(x)=[c_1 I_\beta(bz)+c_2 K_\beta(bz)]z^{-\frac{a}{2}} \qquad (10)$$

که در آن $z=u^{\frac{k+\wp_3}{2}}$ و I_β و K_β یترتیب توابع بسل تغییر یافته نوع اول و دوم هستند. با استفاده از رابطه (۶)و (۱۰) جریان اشباع تاریک بر حسب پهنای بیس بدست آمده است.

$$J_p=q\{\frac{\eta}{W}(\wp_2-1)p(x)-\frac{dp(x)}{dx}\} \qquad (11)$$

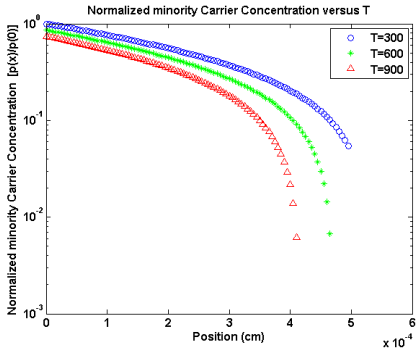
۳- نتایج

ابتدا تراکم حامل های اقلیت با در نظر گرفتن بازترکیب اوژه ، بازترکیب شاکلی – رید – هال و همچنین با در نظر گرفتن هر دو نوع بازترکیب بدست آمده است.



شکل ۲. غلظت حامل های اقلیت نرمالیزه $P(x)/P(0)$ در بیس.

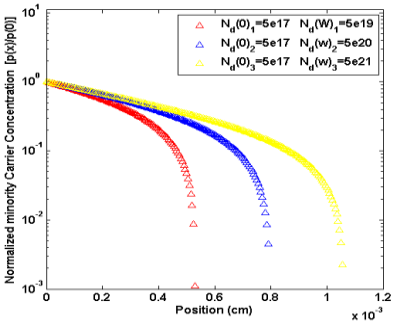
همانطور که شکل(۲) نشان می دهد با در نظر گرفتن هر دو نوع بازترکیب ، غلظت حفره های اقلیت بیشتر از هر کدام از بازترکیبهای اوژه و شاکلی- رید- هال کاهش می یابد. افزایش میدان الکتریکی موجب افزایش چگالی جریان می شود و با کاهش غلظت حامل ها شیب افزایش می یابد. سپس اثر تغییر دما در حالتی که هر دو نوع بازترکیب در نظر گرفته شده، بررسی شده است. شکل (۳) غلظت حامل های اقلیت بر حسب موقعیت برای سه دمای مختلف T=300 , T=600 , T=900 را نشان می دهد.



شکل ۳. غلظت حامل های اقلیت بر حسب موقعیت در ۳ دمای مختلف

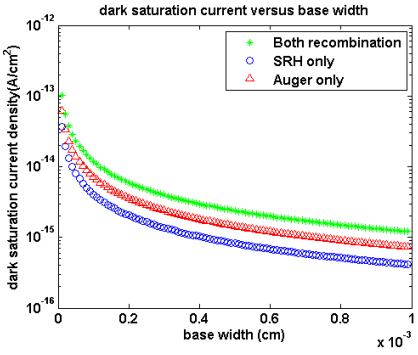
با توجه به شکل (۳) دیده می شود، با افزایش دما غلظت حامل های اقلیت کاهش می یابد و همچنین در موقعیت نزدیکتری به صفر نزدیک می شوند.در مرحله ی بعد، اثر تغییر میزان آلایش بر روی تراکم حاملین اقلیت بررسی شده است. شکل (۴) غلظت حامل های اقلیت برحسب موقعیت برای سه مقدار آلایش را نشان می دهد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-02]



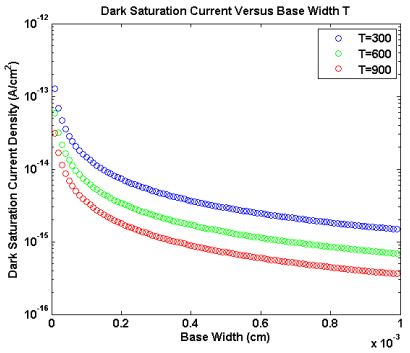
شکل ۴. غلظت حامل های اقلیت بر حسب موقعیت برای آلایش های متفاوت.

همانطور که از شکل (۴) دیده می شود با افزایش میزان آلایش ، چگالی حاملین اقلیت کاهش بیشتری را نشان می دهند که این بعلت افزایش بازترکیب اوژه با افزایش آلایش می باشد . همچنین وابستگی چگالی جریان اشباع تاریک به پهنای بیس در شکل (۵) بررسی شده است.



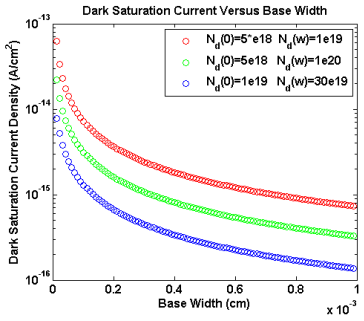
شکل ۵. چگالی جریان اشباع تاریک بر حسب پهنای بیس.

با توجه به شکل (۵) دیده می شود که با کاهش پهنای بیس چگالی جریان اشباع تاریک در بازترکیب شامل هر دو حالت بیشتر از هر کدام از بازترکیب های اوژه و شاکلی- رید- هال افزایش می یابد. در شکل(۶) چگالی جریان اشباع تاریک بر حسب تغییرات پهنای بیس در سه دمای مختلف نشان داده شده است.



شکل ۶. چگالی جریان تاریک بر حسب پهنای بیس در دماهای مختلف

همانطور که از شکل(۶) دیده می شود با افزایش پهنای بیس چریان تاریک کاهش می یابد و هرچه دما بیشترشود جریان تاریک کمتر می شود. در شکل (۷) چگالی جریان تاریک بر حسب پهنای بیس برای سه آلایش متفاوت رسم شده است. طبق شکل با افزایش میزان آلایش بیس، جریان تاریک کاهش یافته است.



شکل ۷- چگالی جریان تاریک بر حسب پهنای بیس با آلایش های های متفاوت.

۳- ۴- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج بدست آمده، دیده می شود که چگالی جریان تاریک در سلولهای خورشیدی گالیم نیترید با افزایش پهنای بیس کاهش می یابد چراکه با افزایش پهنای بیس بازترکیب ها در طول بیس افزایش یافته و امکان رسیدن حاملین به انتهای بیس کمتر می شود ، همچنین با افزایش دما چگالی جریان تاریک کاهش می یابد، با افزایش میزان آلایش بیس چگالی جریان تاریک کاهش می یابد. همچنین با افزایش سرعت بازترکیب سطحی جریان تاریک افزایش می یابد.

مراجع

[1] J. F. Muth, J. H. Lee, I. K. Shmagin, and R. M. Kolbas, Absorption coefficient, energy gap, exciton binding energy, and recombination lifetime of GaN obtained from transmission measurements**, Appl. Phys. Lett**. 71,2571-2574, 1997

[2]ADRIAN KITAI," Principles of Solar Cells, LEDs and Diodes", John Wiley & Sons, Ltd 2011

[3] M. Brendel, A. Kruse, H. Jo¨nen, L. Hoffmann, H. Bremers, U. Rossow, and A. Hangleiter, Auger recombination in GaInN/GaN quantum well laser structures, **Appl. Phys. Lett**. 99, 0311061-6 2011

[4] D. B. M. Klaassen, J. W. Slotboom and H. C. de Graaff, "Unified apparent bandgap narrowing in n-and p-type Silicon", **Solid State Electron**., 35,125-129, 1992.

[5] Guoxin Li, Arnost Neugroschel, C. T. Sah, Don Hemmenway, Tony Rivoli and Jay Maddux,"Analysis of bipolar junction transistors with a Gaussian base-dopant impurity-concentration profile", **IEEE Trans. Electron Devices**, 48, 2945-2947, 2001

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-02]