



بررسی رفتار و مدلسازی یک ترانزیستور نوری دو قطبی نامتجانس

1- مهندس عباس قدیمی ، 2- پانته آ پرور ، 3- مریم پورابراهیمی ،
4- نفیسه واله صابر

1- دانشجوی دکترا دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم ، تحقیقات و فن آوری

Ghadimi555@yahoo.com

2- کارشناس الکترونیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان

pantea_parvar242@yahoo.com

3- کارشناس الکترونیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان

Maryam.poorebrahimi@gmail.com

4- کارشناس الکترونیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان

Nafiseh_v_saber@yahoo.com

چکیده - ترانزیستورهای نوری برای استفاده در دریافت کننده های مدار مجتمع نوری استفاده می شوند. در این تحقیق، آنالیز رفتار نویز در یک ترانزیستور دو قطبی نامتجانس که بصورت آشکارساز نوری سه پایه بکار می رود، ارائه می گردد. در این کار، نسبت سیگنال به نویز در خروجی و نویزها و پارامترهای اصلی مورد بررسی قرار می گیرند. این مدل برای مشخصه HBT Inp/InGaAs که به صورت آشکارساز نوری در ناحیه طول موج 1.55 میکرومتر به کار می رود استفاده می شود.

کلید واژه- ترانزیستور دو قطبی نامتجانس (HBT)، دیودهای نوری بهمی (APD)

مقدمه

گرفته و با ساختار دوپایه مورد مقایسه قرار میگیرند. HPT سه پایه میتواند به صورت آشکار ساز با سرعت بالا با یک حساسیت معقول بکار رود. [3]

برخلاف APD ها، HBT ها می توانند گین زیاد بدون نویز زیاد ایجاد کنند. [1]

2- ساختار قطعه و آنالیز نویز:

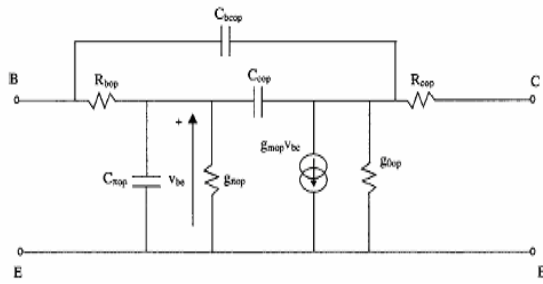
در این ساختار تابش نور از طرف امیتر صورت می گیرد. فلز امیتر و لایه های کنتاکت امیتر بمیزان کمی به جهت سهولت نفوذ نور برداشته می شوند.

ساختار این HBT در شکل (1) آمده است.

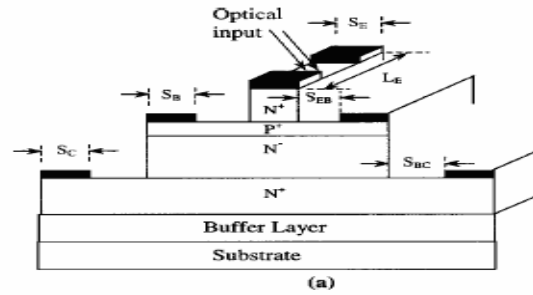
HPT هایی که تاکنون وجود داشته اند، ادوات دو پایه ای با بیس شناور هستند که در این ساختارها گین معمولاً خیلی کم است و برای استفاده در محابرات نوری با سرعت بالا، بلااستفاده می باشند. [2]

در این کار، برای بهبود سرعت HPT ها، این ادوات بصورت آشکار ساز سه پایه مورد بررسی قرار

بار فضایی بیس_ امیتر صرف نظر می کنیم.



شکل (2): مدار معادل سیگنال کوچک HBT تحت شرایط تابش نور



شکل (1): ساختار HBT سه پایه

جزئیات مربوط به این ساختار در جدول (1) لیست شده اند.

جدول (1): جزئیات ساختار HBT:

پارامتر	امیتر (n-type Inp)	بیس (p-type InGaAs)	زیر کلکتور (n-type InGaAs)
غلظت ناخالصی ها (m^{-3})	2×10^{25}	3.5×10^{25}	1×10^{25}
پهنای ناحیه ذاتی (m)	250×10^{-9}	50×10^{-9}	340×10^{-9}
ثابت نفوذ m^2/s	1.32×10^{-4}	51.67×10^{-4}	5.18×10^{-4}
موبیلیتی $m^2/v.s$	51×10^{-4}	1995×10^{-4}	200×10^{-4}
طول نفوذ (m)	1900×10^{-9}	360×10^{-9}	719×10^{-9}
طول عمر حامل های اقلیت (s)	2.52×10^{-12}
ضریب جذب ($1/m$)	0	1.5×10^6	1.5×10^6
جرم حفره	$0.075 m_0$	$0.47 m_0$
سرعت اشباع (m/s)	4.7×10^5
سرعت باز ترکیب سطحی (m/s)	10^2	0

در این آنالیز از اثر جذب نوری در ناحیه امیتر بدلیل شکاف انرژی وسیع و جذب نور در بیس در ناحیه

زمانی که در یک HBT, بیس از امیتر غلظت بیشتری داشته باشد, نفوذ ناحیه بار در بیس خیلی کوچک بوده, و در نتیجه از جذب در این قسمت صرف نظر می کنیم. شکل (2) مدار معادل سیگنال کوچک HBT تحت شرایط تابش نور را می نمایاند.

3- اجزای نوین

نوین در HBT چهار جزء اصلی دارد: نوین گرمایی بواسطه مقاومت بیس, SHOT NOISE در اتصال بیس_امیتر به واسطه الکترونیایی که باحفره باز ترکیب میشوند, SHOT NOISE در اتصال بیس_کلکتور به واسطه الکترونیای جمع آوری شده و نوین $1/f$ که از باز ترکیب الکترونها در سطح بیس ناشی می شود تقسیم می گردند. در بین این اجزای نوین, نوین $1/f$ تنها در رنج فرکانسی پایین (کمتر از 1 مگاهرتز) شایع بوده و بنابراین در این آنالیز از آن صرف نظر می کنیم. سه جزء دیگر نوین تحت شرایط کاری نرمال در HBT همیزان زیادی بوسیله حامل های اضافی ایجاد شده توسط جذب فوتون ها موقعی که به عنوان آشکارساز نور بکار می روند تاثیر می پذیرند. تولید تصادفی حاملها به واسطه جذب نوری بشکل افزایش SHOT NOISE در مدارات بیس - کلکتور و بیس - امیتر ظاهر می شوند. حامل های اضافی همچنین مقاومت بیس را تحت تاثیر قرار داده و به موجب آن اجزای نوین گرمایی برخواسته از آن را تغییر می دهند. مدل معادل نوین HBT در حضور یک سیگنال نوری در شکل (3)

نشان داده شده است.

صورت زیر نوشته شود:

$$i_{lop}^2 = 2qI_{bop} \Delta f \quad (4)$$

جریان بیس در شرایط نوری بصورت زیر مشخص می گردد:

$$I_{bop} = (J_{n0} + J_{ph}) A_E \quad (5)$$

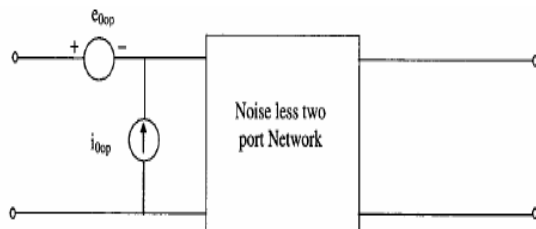
جریان کلکتور در شرایط تاباندن نور به شکل زیر تعیین می گردد:

$$I_{cop} = [(1 + \beta) J_{ph} + J_{cdc}] A_c \quad (6)$$

که β گین جریان dc کلکتور به بیس است. مقدار متوسط مربع جریان $shot\ noise$ در عرض اتصال کلکتور-بیس بواسطه الکترون های جمع شده بدلیل تابش نور از رابطه زیر بدست می آید:

$$\overline{i_{2op}^2} = 2qI_{cop} \Delta f \quad (7)$$

مدار معادل نویز HBT که بصورت آشکار ساز بکار می رود (شکل (3)) به یک شبکه دو دهنه بدون نویز به همراه ولتاژ نویز وابسته و منبع جریان متصل به ورودی آن تبدیل می شود.



شکل (4): نمایش زنجیره ای شبکه نویز

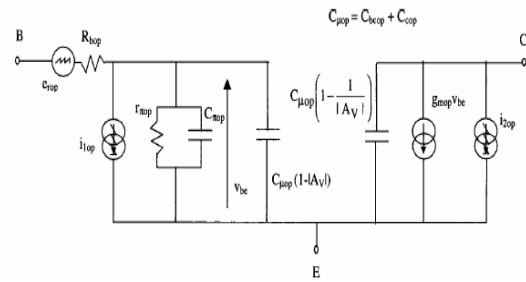
معادلات و مقادیر متوسط مربع ولتاژ نویز و اجزای وابسته در ورودی آن می توان می توانند به صورت زیر نوشته شوند.

$$\overline{i_{Oop}^2} = \overline{i_{lop}^2} + \frac{1}{\beta_{op}^2} \left(1 + \frac{f^2}{f_c^2}\right) \overline{i_{2op}^2}$$

$$\overline{e_{Oop}^2} = \overline{e_{rop}^2} + R_{bop} \overline{i_{lop}^2} + \frac{1}{\beta_{op}^2 g_{\pi op}^2} \overline{i_{2op}^2}$$

$$\overline{e_{Oop} i_{Oop}^*} = \overline{e_{rop} i_{lop}^*} + R_{bop} \overline{i_{lop} i_{lop}^*} + \frac{1}{\beta_{op}^2 g_{\pi op}^2} \left(1 - j \frac{f}{f_c}\right) \overline{i_{2op}^2}$$

(8)



شکل (3): مدل معادل نویز HBT در حضور یک سیگنال نوری

این مدل، شامل یک منبع ولتاژ نویز e_{rop}^2 که در عرض بیس امیتر موازی بامنبع جریان قرار می گیرد و یک منبع نویز جریان i_{2op}^2 که در عرض پایه های امیتر-کلکتور قرار می گیرد. عبارات بدست آمده برای اجزای نویز مختلف به صورت روابط زیر دنبال می شوند. متوسط مربع نویزگرمایی بواسطه مقاومت بیس R_{bop} از رابطه زیر بدست می آید:

$$\overline{e_{rop}^2} = 4kTR_{bop} \Delta f \quad (1)$$

که Δf پهنای باندمی باشد. مقاومت بیس در شرایط نور بوسیله رابطه زیر بدست می آید:

$$R_{bop} = \frac{\rho_{blop} S_E}{12W_b L_E} + \frac{\rho_{bsop} S_{EB}}{2L_E} + \frac{\rho'_{bsop} L_T \coth\left(\frac{S_B}{L_T}\right)}{2L_E} \quad (2)$$

که S_E ، پهنای نوار امیتر و S_B و S_{EB} پهنای نوار بیس و جدا ساز بیس-امیتر هستند. L_E پهنای قطعه و L_T طول انتقال است که به کمک رابطه زیر بدست می آید:

$$L_T = \sqrt{\frac{\rho_{cop}}{\rho'_{bsop}}} \quad (3)$$

که ρ_{cop} و ρ_{blop} مقاومت ذاتی بیس و کلکتور هستند. ρ_{bsop} و ρ'_{bsop} مقاومت ورقه ای لایه ی خارجی بین امیتر و کنتاکت بیس و لایه بیس می باشند. مقدار متوسط مربع جریان SHOT NOISE در عرض بیس-امیتر ایجاد می شود و در حضور نور می تواند به

که R_{eq} ، معادل مقاومت خروجی مدار و مقاومت ورودی طبقه بعد است. (معمولاً یک پیش تقویت کننده به عنوان دریافت کننده نوری) توان نویز مرجع خروجی از رابطه زیر بدست می آید:

$$N = \overline{i_n^2(t)} R_{eq} \quad (14)$$

توان نویز خروجی (N) می تواند به سه قسمت شکسته شود. این اجزاء از روابط زیر به دست می آیند.

$$N_{i1} = \overline{i_{lop}^2} |H(f)|^2 + R_{bop}^2 \overline{i_{lop}^2} |H(f)|^2 |Y_i(f)|^2 + 2 |H(f)|^2 \text{Re}\{Y_i(f)\} R_{bop} \overline{i_{lop}^2}$$

$$N_{i2} = \frac{1}{\beta_{op}^2} (1 + \frac{f^2}{f_c^2}) \overline{i_{2op}^2} |H(f)|^2 + \frac{R_{bop}^2}{\beta_{op}^2} (1 + \frac{f^2}{f_c^2}) \overline{i_{2op}^2} |H(f)|^2 |Y_i(f)|^2 \quad (15)$$

$$+ (-\frac{1}{\beta_{op}^2 g_{\pi op}^2} + \frac{2R_{bop}}{\beta_{op}^2 g_{\pi op}}) \overline{i_{2op}^2} |H(f)|^2 |Y_i(f)|^2 + 2 |H(f)|^2 [\frac{R_{bop}}{\beta_{op}^2} (1 + \frac{f^2}{f_c^2}) \overline{i_{2op}^2} + \frac{i_{2op}^2}{\beta_{op}^2 g_{\pi op}}]$$

$$* (g_{\pi op} + 2\pi f C_{\mu op} A_{V1}) + 2 |H(f)|^2$$

$$* [\frac{2\pi f^2}{\beta_{op}^2 g_{\pi op} f_c} \overline{i_{2op}^2} \{C_{\pi op} + C_{\mu op} (1 - A_{VR})\}]$$

$$N_{th} = e_{nop}^2 |H(f)|^2 |Y_i(f)|^2$$

که A_{V1} و A_{VR} مقادیر حقیقی و موهومی گین ولتاژ می باشند. Responsivity به صورت زیر تعیین می شود:

$$\mathcal{R} = \frac{I_{cop} - I_c}{P_{opt}} = \frac{\beta_{op} I_{ph}}{P_{opt}} \quad (16)$$

که در این رابطه I_c ، جریان کلکتور HBT در عدم حضور نور است.

5- بحث و نتیجه گیری

مقدار گین جریان (β) را در عدم حضور نور 100 در نظر می گیریم. شکل (5) اجزای مختلف نویز بر حسب فرکانس را نشان داده می دهد:

گین جریان کلکتور به بیس در شرایط تاباندن نور β_{op} ، به صورت زیر تعیین می گردد.

$$\beta_{op} = \frac{I_{cop}}{I_{bop}} \quad (9)$$

در این رابطه، از جزء نویز وابسته به منابع جریان صرف نظر شده است.

منابع نویز مختلف HBT به اجزای اصلی زیر بر اساس مدل شکل (4) به سه مؤلفه کاهش می یابند که شامل مولد جریان نویز معادل HBT، i_{oop} بامتوسط مربع جریان نویز، مولد ولتاژ نویز معادل HBT، با متوسط مربع ولتاژ نویز و جزء وابسته بین دو منبع نویز.

4- نسبت سیگنال به نویز (S/N)

برای محاسبه نسبت S/N، لازم است تابع انتقال مدار معادل سیگنال کوچک HBT را پیدا کنیم. در اینجا A_V ، گین ولتاژ مدار را عرضه می کند. ادمیتانس ورودی مدار طبق رابطه (10) مشخص می گردد:

$$Y_i(f) = g_{\pi op} + j2\pi f [C_{\pi op} + C_{\mu op} (1 - A_V)] \quad (10)$$

تابع انتقال مدار بوسیله رابطه زیر تعیین می گردد:

$$H(f) = \frac{g_{mop} v_{be}}{Y_i(f) v_{be}} = \frac{g_{mop}}{Y_i(f)}$$

$$= \frac{g_{mop}}{g_{\pi op} + j2\pi f [C_{\pi op} + C_{\mu op} (1 - A_V)]} \quad (11)$$

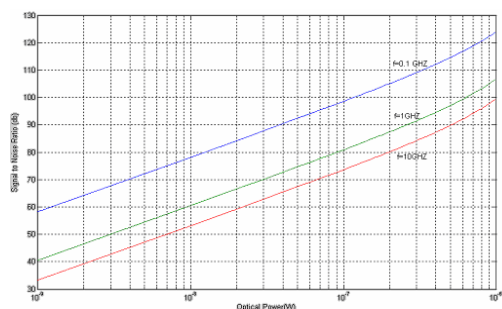
جزء v_{be} ، سیگنال ولتاژ در عرض اتصال بیس-امیتر می باشد. نظر به اینکه درمد آشکارساز هیچ منبع ac فیزیکی در ورودی وجود ندارد. گین ولتاژ بصورت زیر به دست می آید:

$$A_V = \frac{-g_{mop}}{\frac{1}{R_i} + j2\pi f C_{\mu op}} \quad (12)$$

توان سیگنال بشکل زیر خواهد بود:

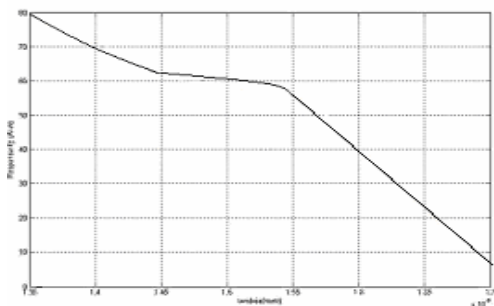
$$S = I_{ph}^2 |H(f)|^2 R_{eq} \quad (13)$$

توان نوری دریافتی برای مقادیر مختلف فرکانس کاری در شکل (7) رسم شده است.

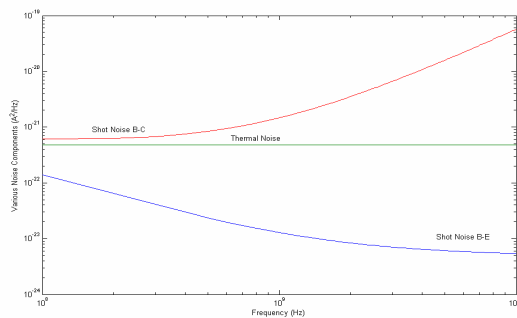


شکل (7): منحنی شبیه سازی شده نسبت S/N با توان نوری دریافتی برای مقادیر مختلف فرکانس کاری

این منحنی نشان می دهد که این نسبت با افزایش توان نوری دریافتی افزایش می یابد. به این دلیل که توان دریافتی بالاتر، جریان نوری بیشتری را القاء می کند که سبب افزایش قابل ملاحظه آن می شود. همچنین جریان نوری ایجاد شده، جزء نویزی مدار بیس-کلکتور را افزایش می دهد، ولی افزایش در توان سیگنال در خروجی خیلی بیشتر از افزایش اجزای نویزی جریان می باشد. همچنین در یک توان نوری مشخص، این نسبت با افزایش فرکانس کار کاهش می یابد. دلیل این کاهش، افزایش اجزای نویز در جریان کلکتور در فرکانس های بالاتر و همچنین کاهش تابع انتقال مدار می باشد. شکل (8) شبیه سازی تغییر responsivity بر حسب طول موج نور تابشی را نشان می دهد.

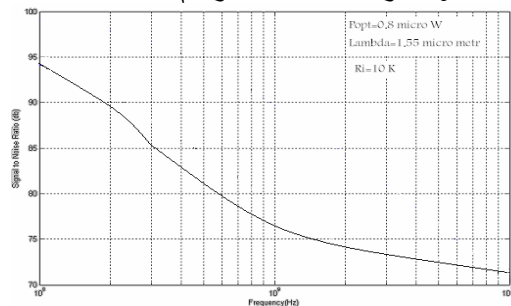


شکل (8): منحنی شبیه سازی شده responsivity بر حسب طول موج نور تابشی



شکل (5): منحنی شبیه سازی شده اجزای مختلف نویز بر حسب فرکانس

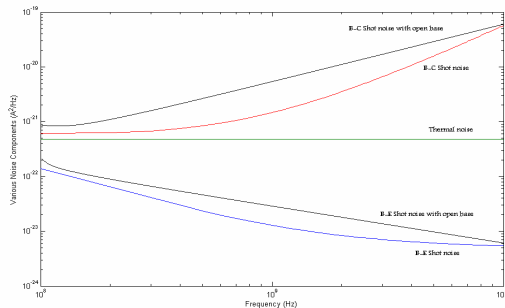
این منحنی نشان می دهد که توان نویز به دلیل جریان نویز گرمایی که در دمای ثابت در مدار ایجاد می شود ثابت بوده و مستقل از فرکانس می باشد. توان نویز بدلیل اتصال بیس-کلکتور به طور سریع با افزایش فرکانس برای فرکانس بالای 1 GHz افزایش می یابد. توان نویز ناشی از اتصال بیس-امیتر با افزایش فرکانس ابتدا کاهش می یابد و سپس برای مقادیر بالاتر از 1 GHz به مقدار ثابتی می رسد. همچنین دیده می شود که شرکت جزء نویزی مربوط به بیس-امیتر در مقایسه با نویز گرمایی و جزء نویز مدار کلکتور در فرکانس های بالا قابل صرف نظر می باشد. منحنی شبیه سازی شده تغییر نسبت S/N با فرکانس در شکل (6) رسم شده است.



شکل (6): منحنی شبیه سازی شده تغییرات نسبت S/N با فرکانس

مشاهده می شود که برای یک توان نوری دریافتی ثابت، نسبت S/N با افزایش فرکانس در مقادیر بالا به طور سریع نزول می کند. دلیل آن به واسطه افزایش سریع جزء جریان نویز کلکتور در این محدوده فرکانسی می باشد. منحنی شبیه سازی شده نسبت S/N با

در شکل (11) ، منحنی مولفه های نویز در حالت های باز بودن بیس (دو پایه بودن ترانزیستور نوری) و ترانزیستور سه پایه ما رسم شده اند. مشاهده می شود ، در فرکانس های میانی حدود دو برابر افزایش نویز خواهیم داشت.



شکل (11): مولفه های نویز در حالت های باز کردن پایه بیس و مقایسه با حالت سه پایه

در این تحقیق ، با بررسی پارامترهای مختلف HBPT سه پایه ، نشان داده شد که این ساختار نسبت به نوع دو پایه برتری محسوس از لحاظ دارا بودن سرعت بیشتر و دامنه کمتر مولفه های نویزی دارد.

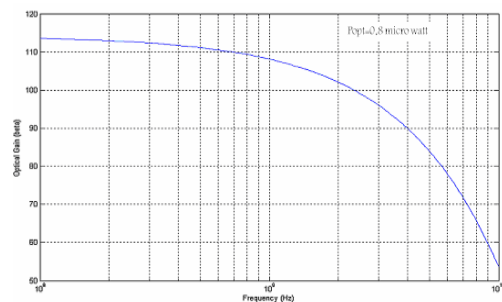
مراجع

- 1- S. M. Frimel and K. P. Roenker , "Thermionic - field-diffusion model for npn bipolar heterojunction phototransistor," J. Appl. Phys. 82,1427-1437(1997).
- 2- S. M. Frimel and K. P. Roenker , " Gummel-Poon model for npn heterojunction bipolar phototransistors," J. Appl. Phys. 82, 3581-3591 (1997) .
- 3-P.Chakrabarti, et all," Noise modeling of an InP/InGaAs heterojunction bipolar phototransistor", J. opt. eng , Vol. 42 No. 4,939-947, April 2003.

که میزان بالای responsivity (بزرگتر از 50A/W) را در ناحیه طول موج بین 1/35 تا 1/55 میکرومتر است نشان میدهد.

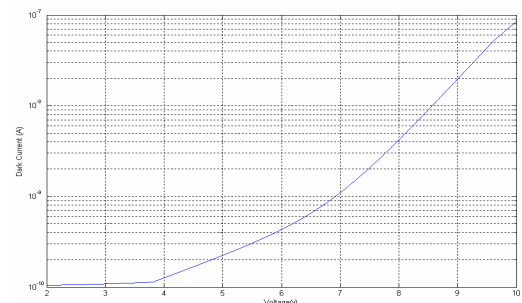
در بالای 1/55 میکرومتر ، responsivity ، با شیب خیلی زیاد، کم می شود. علت بالا بودن نسبی آن ، عمل تقویت HBPT است. منحنی مشخصه تغییر گین نوری بر حسب فرکانس در شکل (9) نشان داده شده .

همانطور که از منحنی بر می آید ، در فرکانس های تا گیگا هرتز ، گین نسبتاً ثابت با مقدار 115 داریم و در فرکانس های بالاتر کاهش گین با افزایش فرکانس ، محسوس می باشد .



شکل (9) : منحنی شبیه سازی شده تغییر گین نوری بر حسب فرکانس نور تابشی

شکل (10) منحنی جریان تاریک بر حسب ولتاژ رامی نمایاند. که تا ولتاژ 3/8V ، ناچیز و در ولتاژهای بالاتر مقدارش قابل ملاحظه است.



شکل (10) : جریان تاریک بر حسب تغییرات ولتاژ بیاس