

بررسی عوامل مؤثر در جریان تاریک آشکارساز دیودی InSb مادون قرمز

محسن مرادی و محمد دارایی: صنایع قطعات نیمه‌هادی، صنعت آبتوالکترونیک

چکیده

این مقاله گزارشی از محاسبه و اندازه‌گیری جریان‌های ناشی فتودیود InSb از نوع p⁺-n ساخته شده به روش Mesa است. محاسبات و اندازه‌گیری جریان‌های مختلف ناشی مؤثر در دیود InSb همراه با تغییرات آن با توجه به بایاس اعمالی نشان می‌دهند که در بایاس‌های معکوس نسبتاً کم (تا حدود ۳۰۰ mV) جریان‌های G-R و شنت غالب هستند. اما در ولتاژهای معکوس بالاتر، جریان تونل‌زنی غالب می‌شود. در این مقاله رابطه پارامترهای قطعه با میزان جریان ناشی بررسی شده است و با ساخت یک دیود p⁺-n با کیفیت بالا، به بررسی موارد فوق پرداخته شده است.

مقدمه

فتودیود InSb یکی از بهترین و پرکاربردترین آشکارسازها در طول موج‌های مادون قرمز محدوده ۳-۵ μm است [۶]. در یک آشکارساز، داشتن نسبت سیگنال به نویز بالا بسیار مهم است. نویز در یک آشکارساز فتوولتایک ارتباط مستقیمی با جریان تاریک دیود دارد [۳]، عوامل مختلفی تعیین‌کننده میزان جریان تاریک در دیود InSb هستند، انتخاب یک ویفر مناسب با تراکم مطلوب ناخالصی‌ها در دو طرف پیوند و کنترل پروسه‌های تمیزکاری و اکسیداسیون مناسب لبه‌های پیوند می‌توانند ما را به یک آشکارساز با جریان تاریک پایین برسانند. از دیگر عوامل مؤثر در میزان جریان ناشی بایاس اعمالی به آشکارساز است. میزان جریان ناشی در بایاس صفر ولت کمترین مقدار است و با افزایش بایاس معکوس مقدار آن زیاد می‌شود [۸].

به‌طور کلی جریان ناشی (I_0) حاصل جمع جریان‌های دیفیوژن (I_d)، تولید-بازترکیب (I_{G-R})، شنت موازی (I_s) و تونل‌زنی (I_t) است [۲]:

$$I_0 = I_d + I_{G-R} + I_s + I_t \quad (1)$$

جریان دیفیوژن، جریانی حاصل از حامل‌های اقلیت موجود در دو طرف لبه پیوند با فاصله یک طول نفوذ

حامل است. رابطه (۲) چگالی جریان دیفیوژن را نشان می‌دهد [۵].

$$J_D = \frac{qD_p P_{n0}}{L_p} + \frac{qD_n n_{p0}}{L_n} \quad (2)$$

واژه‌های کلیدی: فتودیود ایندیوم آنتیموناید، آشکارساز مادون قرمز، جریان تاریک

پذیرش ۸۸/۱۰/۲

دریافت ۸۷/۹/۱۲

L_p و D_p به ترتیب ضریب نفوذ و طول نفوذ حامل اقلیت در نیمه‌هادی نوع n ، D_n و L_n ضریب نفوذ و طول نفوذ حامل اقلیت در نیمه‌هادی نوع p ، n_{p0} تراکم حامل اقلیت در نیمه‌هادی نوع P ، p_{n0} تراکم حامل اقلیت در نیمه‌هادی نوع n است.

میزان این جریان به تراکم ناخالصی‌ها در دو طرف پیوند وابسته است. افزایش تراکم ناخالصی در دو طرف پیوند باعث کاهش n_{p0} و p_{n0} می‌شود که نتیجه آن کاهش جریان است. نکته مشخصه این جریان غیر وابسته بودن میزان آن به بایاس اعمالی است. در یک دیود $p-n$ که تراکم ناخالصی‌ها در دو طرف پیوند تا مرز تبه‌گن بالا است و $p_{n0} \gg n_{p0}$ است، رابطه چگالی جریان دیفیوژن را می‌توان به‌صورت خلاصه شده زیر بیان کرد:

$$J_D = q \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \frac{n_i^2}{N_D}$$

که در آن n_i تراکم ذاتی حامل‌ها، τ_p طول عمر حامل اقلیت در نیمه‌هادی نوع n و N_D تراکم ناخالصی در نیمه‌هادی نوع n است.

جریان $G-R$ ، جریانی حاصل از تولید و بازترکیب ناخواسته حامل‌ها در ناحیه تخلیه^۱ است و عوامل بوجود آورنده آن تله‌ها و نقایص کریستالی ناحیه تخلیه است. جریان تولید و بازترکیب در ناحیه تخلیه از رابطه زیر به‌دست می‌آید [۱]:

$$J_{gen} = \frac{qn_i W}{\tau_e} \quad (3)$$

W پهنای ناحیه تخلیه و τ_e طول عمر مؤثر حامل‌هاست. جریان تولید و بازترکیب مانند جریان دیفیوژن به دما و E_g نیمه‌هادی بستگی زیادی دارد [۲]:

$$J_{gen} \propto T^{3/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2KT}\right) (V_{bi} - V)^{1/2} \quad (4)$$

V_{bi} پتانسیل سد است و از رابطه (۵) به‌دست می‌آید.

$$V_{bi} = \frac{KT}{q} \ln \left[\frac{N_D N_A}{n_i^2} \right] \quad (5)$$

برخلاف جریان دیفیوژن این جریان با مجذور بایاس اعمالی متناسب است. دلیل این افزایش، متناسب بودن W با مجذور بایاس خارجی است.

$$W = \left[\frac{2K_S \epsilon_0}{q} (V_{bi} - V) \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) \right]^{1/2} \quad (6)$$

N_D و N_A به ترتیب تراکم ناخالصی‌های نوع p و n ، K_S ضریب دی الکتریک نیمه‌هادی است.

^۱.depletion

جریان شنت موازی، جریانی اهمیت است که با رابطه خطی $I-V$ نمایش داده می‌شود. این جریان حاصل از نشت جریان در امتداد سطح لبه‌های پیوند است و طبق رابطه زیر با دما، E_g و بایاس اعمالی متناسب است [۲]:

$$J_{sh} \propto VT^{3/2} \exp(-E_g/2kT) \quad (7)$$

کیفیت سطوح نیمه‌هادی و اکسید آندی به‌کار رفته در لبه‌های پیوند، تعیین کننده میزان این جریان است. یک اکسید مناسب در سطح تشکیل پیوند که دارای مراکز بار کمی باشد در کاهش این جریان بسیار مؤثر است. این جریان به‌صورت خطی با ولتاژ افزایش می‌یابد و آن را می‌توان با یک مقاومت R_s موازی با دیود شبیه‌سازی کرد.

جریان تونلی، جریانی حاصل از نازک بودن سد پتانسیل است، ناخالصی شدید در دو طرف پیوند و نزدیک شدن به حالت تبه‌گن، طبق آنچه گفته شد ضامن کم بودن جریان دیفیوژن است. اما این افزایش ناخالصی، باعث آن می‌شود که در ولتاژهای معکوس کم، نوار هدایت n در مقابل نوار ظرفیت p قرار گیرد. این وضعیت باعث آن می‌شود تا تعدادی از حالت‌های خالی نوار هدایت طرف n در مقابل تعداد زیادی از حالت‌های پر نوار ظرفیت p قرار گیرد. نازک بودن سد در این حالت باعث ایجاد پدیده تونل‌زنی الکترون‌ها از نوار ظرفیت p به نوار هدایت n و ایجاد جریان معکوس می‌شود. جریان تونل در یک دیود p^+-n نوع InSb را می‌توان با رابطه (۸) نشان داد [۲]:

$$I_T = K_1 (V_{bi} - V)^{1/2} \left(\frac{V^2}{T} \right) \exp \left(\frac{-K_2}{(V_{bi} - V)^{1/2}} \right) \quad (8)$$

که در آن V بایاس اعمالی، K_1 و K_2 ضرایب ثابت مخصوص InSb (اشاره شده در مرجع ۲) و V_{bi} پتانسیل سد حساسه‌اند.

جزئیات ساخت

در پروسه عملی ساخت دیود p^+-n روی زیرلایه InSb نوع n با تراکم ناخالصی 10^{15} cm^{-3} به کمک دیفیوژن حرارتی، ناخالصی Cd را با تراکم 10^{18} cm^{-3} نفوذ می‌دهیم. بدین منظور ابتدا سطوح زیرلایه را با ترکیبات آلی، نظیر الکل و استن تمیز و با استفاده از محلول پولیش شیمیایی مناسب، مانند HNO_3 : CP4A ($\text{CH}_3\text{-COOH}$: HF : H_2O at 2:1:1:10) سطح ویفر را آماده پروسه دیفیوژن می‌کنیم [۷]. تراکم ناخالصی نفوذ داده شده توسط اندازه‌گیری اثر هال به‌صورت دقیق سنجیده می‌شود. دیودهای دیفیوژن شده پس از لیتوگرافی، با تکنیک Mesa و زدایش شیمیایی از هم جدا شده [۹] و با استفاده از اکسید آندی مناطق زدایش شده را اکسید می‌کنیم. مساحت ناحیه حساس دیود ساخته شده پس از برش قطعات، 1 mm^2 است.

دیودهای ساخته شده در دمای ۷۷ K (نیتروژن مایع) که دمای کار فتودیودهای InSb است با سیستم اندازه‌گیری کیتلی^۱ سنجش جریان-ولتاژ می‌شوند.

جدول (۱) تعدادی از پارامترهای دیود ساخته شده را نشان می‌دهد.

جدول ۱. پارامترهای دیود ساخته شده

تراکم ذاتی حامل‌ها n_i (cm^{-3})	طول عمر حفره‌ها در نیمه‌هادی نوع n τ_{pn} (s)	مساحت ناحیه حساس A_d (cm^2)	طول نفوذ حفره‌ها در نیمه‌هادی نوع n L_{pn} (μm)
1×10^9	8×10^{-7}	1×10^{-2}	80

توضیحات و نتایج

با جاگذاری پارامترهای اندازه‌گیری شده جدول ۱ در رابطه (۲)، میزان جریان دیفیوژن دیود ساخته شده به

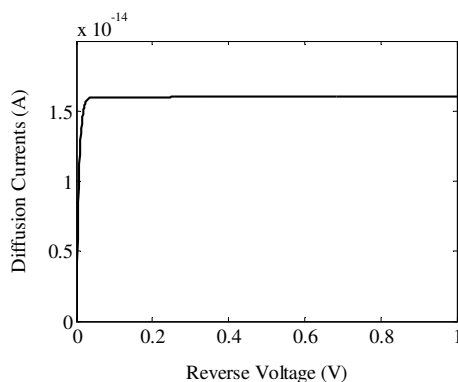
شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$J_D = 1.6 \times 10^{-19} \times \frac{8 \times 10^{-3} \text{ cm}}{8 \times 10^{-7} \text{ s}} \left(\frac{10^{18}}{10^{15}} \right) = 1.6 \times 10^{-12} \text{ q/cm}^2 \cdot \text{s}$$

$$i_d = 1.6 \times 10^{-12} \times 1 \times 10^{-2} \Rightarrow 1.6 \times 10^{-14} \text{ q/s}$$

اگر چگالی جریان نشستی دیود تنها حاصل از I_d باشد، طبق رابطه (۲)، منحنی ولت - آمپر دیود به شکل (۱)

خواهد بود:



شکل ۱. تغییرات جریان دیفیوژن به ازای تغییرات ولتاژ معکوس

این نوع جریان شدیداً به دما، گاف انرژی نیمه‌هادی (E_g)، تراکم ناخالصی‌ها و کیفیت ویفر وابسته است.

افزایش دما و کم بودن E_g و کاهش تراکم ناخالصی‌ها و عیوب کریستالی زیاد ویفر، باعث افزایش این جریان می‌شود.

برای محاسبه جریان تولید- باز ترکیب به مقادیر پتانسیل سد و پهنای ناحیه تخلیه نیاز داریم. با توجه به روابط

(۵) و (۶) و مقادیر جدول ۱، پتانسیل سد دیود p^+-n ساخته شده حدود ۱۶۰ mV و میزان پهنای ناحیه تخلیه در

بایاس صفر $0.6 \mu\text{m}$ است؛ از همین رو با توجه به رابطه (۳) مقدار این جریان در بایاس صفر به صورت زیر

قابل محاسبه است:

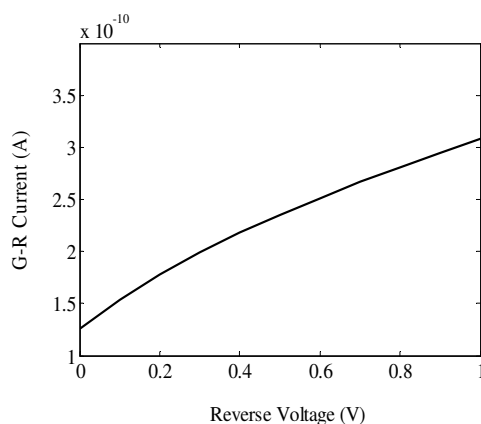
^۱.keithley

$$J_{gen} = \frac{qn_i W}{\tau_e} = \frac{1.6 \times 10^{-19} \times 1 \times 10^9 \times 0.6 \times 10^{-4}}{8 \times 10^{-7}} = 1.2 \times 10^{-8} \text{ q/cm}^2 \cdot \text{s}$$

$$i_{gen} = 1.2 \times 10^{-8} \times 1 \times 10^{-2} \Rightarrow 1.2 \times 10^{-10} \text{ q/s}$$

و با توجه به تابعیت این جریان با مجذور ولتاژ اعمالی، طبق رابطه (۳)، منحنی $I_{G-R}-V$ دیود ساخته شده

مانند شکل (۲) خواهد بود:



شکل ۲. تغییرات جریان تولید- باز ترکیب به ازای تغییرات ولتاژ معکوس

رابطه دیگری که عموماً برای جریان تونل زنی استفاده می شود رابطه (۹) است [۵].

$$J_T = \frac{q^3 E V}{4\pi^2 h} \sqrt{\frac{2m^*}{E_g}} \exp\left(-\frac{4\sqrt{2m^* E_g^3}}{3qhE}\right) \quad (9)$$

که در آن m^* جرم مؤثر الکترون و h ثابت پلانک، E بر حسب v/cm میزان میدان داخل پیوند است. طبق این رابطه جریان تونل زنی در دیود از حاصل ضرب یک مقدار در یک تابع نمایی به دست می آید. مشاهده می شود که بایاس اعمالی و میدان ناشی از آن، هم در ضریب تابع و هم در جزء نمایی وجود دارد. در بایاسی که میزان تابع نمایی از مقادیر بسیار کوچک خارج شده و چشمگیر شود، میزان جریان تونل زنی شروع به افزایش می کند. با جاگذاری مقادیر عددی در رابطه (۹) داریم:

$$J_T = \alpha E V \exp(-9 \times 10^7 / E)$$

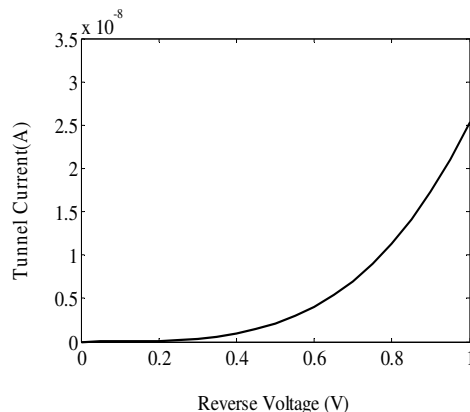
افزایش بایاس اعمالی باعث افزایش E و کاهش مقدار داخل پرانتز می شود و با توجه به منفی بودن آن افزایش شدید جریان تونلی را از یک ولتاژ معکوس به بالا داریم. میزان E میدان داخلی را می توان مجموع E_0 میدان حاصل از تعادل E حاصل از اعمال ولتاژ خارجی دانست. E_0 را می توان از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$E_0 = -\frac{q}{\epsilon} N_d \quad x_{n0} \approx 6 \times 10^3 \text{ V/cm} \quad (10)$$

x_{n0} طول ناحیه تخلیه در نیمه هادی نوع n و ϵ ضریب دی الکتریک ($K_s \times \epsilon_0$) است.

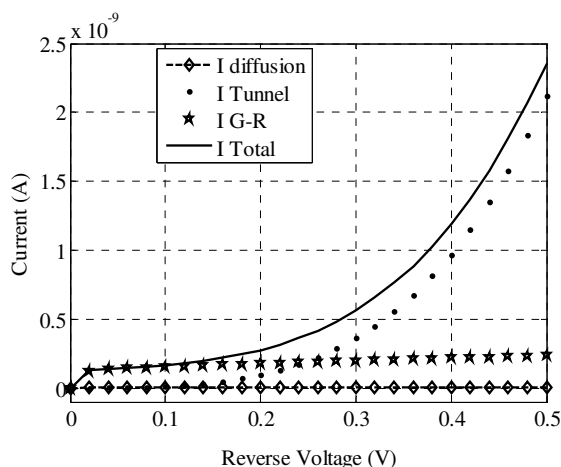
اگر چگالی جریان نشتی دیود تنها حاصل از I_t باشد، طبق رابطه (۸)، منحنی I_t - V دیود به شکل ۳ خواهد

بود.



شکل ۳. تغییرات جریان تونل‌زنی به ازای تغییرات ولتاژ معکوس

با توجه به آنکه جریان نشتی دیود مجموع تمام جریان‌های نشتی می‌باشد (رابطه ۱)، شکل زیر را می‌توان برای جریان‌های دیود مورد نظر ترسیم کرد. نمودار منحنی رسم شده با خط پیوسته، حاصل جمع جریان‌های دیفیوژن، تولید- بازترکیب و تونلی است. در این شکل، منحنی جریان شنت وجود ندارد زیرا ترسیم عددی آن مشکل است، اما عموماً مقدار آن کمی بیش از جریان تولید- بازترکیب است [۶].



شکل ۴. منحنی‌های شبیه‌سازی شده جریان‌های نشتی دیود p^+-n ایندیوم آنتیموناید

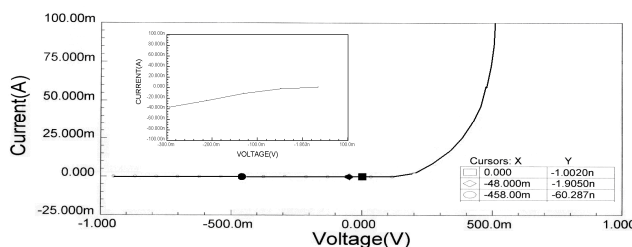
این شکل نشان می‌دهد که در ولتاژهای معکوس نزدیک صفر، جریان‌های تولید- بازترکیب و شنت، جریان‌های غالب هستند. با توجه به آنکه در این دیودها به منظور کاهش جریان دیفیوژن، میزان ناخالصی در دو طرف پیوند را نزدیک مرز تبهگن انتخاب می‌کنند از این رو در ولتاژهای معکوس نسبتاً پایین جریان تونل‌زنی شروع به افزایش می‌کند و جریان غالب نشتی می‌گردد.

جدول ۲، جریان‌های ناشی مؤثر در بایاس صفر را در یک فتودیود InSb از نوع p^+-n بر اساس محاسبات تئوری انجام شده نشان می‌دهد:

جدول ۲. جریان‌های ناشی دیود p^+-n در بایاس صفر با توجه به محاسبات تئوری

مجموع جریان‌های ناشی (I_{total})	جریان تونلی (I_t)	جریان شنت (I_s)	جریان تولید-باز ترکیب (I_{G-R})	جریان دیفیوژن (I_d)
$\approx 420 \text{ pA}$	≈ 0	$\approx 3 \times 10^{-10}$	1.2×10^{-10}	1.6×10^{-14}

انتخاب مناسب تراکم ناخالصی‌ها در دو طرف پیوند و رعایت تمیزی در هنگام پروسه‌ها و انتخاب PH مناسب محلول اکسیداسیون تا حد زیادی نتایج عملی ما را به محاسبات انجام شده و جریان ناشی مناسب برای ساخت آشکارسازهای با نویز کم نزدیک کرده است. شکل ۵، منحنی جریان-ولتاژ دیود ساخته شده در دمای K ۷۷ (نیتروژن مایع) را نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که جریان دیود در بایاس صفر nA -۱ است که با محاسبات تئوری ارائه شده در جدول ۲، همخوانی نزدیکی دارد. در بایاس‌های معکوس بالاتر به علت ظاهر شدن پدیده تونل‌زنی، جریان ناشی قطعه به شدت افزایش پیدا می‌کند و استفاده از آشکارساز دیودی در این بایاس‌ها نویز زیادی را به همراه خواهد داشت. در بایاس معکوس حدود ۰/۵ V جریان تاریک تقریباً ۶۰ برابر جریان تاریک در بایاس صفر است.



شکل ۵. منحنی جریان-ولتاژ عملی دیود p^+-n در دمای ۷۷ K تحت شرایط کاملاً تاریک

نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت نویز در آشکارساز مادون قرمز و ارتباط مستقیم آن با جریان تاریک لازم است تا جریان ناشی را کاهش داد. برای کاهش جریان ناشی باید ویفر مناسبی با کمترین عیوب کریستالی انتخاب کنیم و بعد از انجام پروسه‌های ساخت، با یک اکسید آندی لبه‌های پیوند را بپوشانیم. آنچه در کنترل جریان ناشی اهمیت زیادی دارد انتخاب مناسب تراکم ناخالصی‌ها و انتخاب بایاس مناسب است. انتخاب تراکم ناخالصی‌ها در مرز تبهگن بهترین حالت ممکن است. با این انتخاب و نزدیکی بایاس قطعه تا حد ممکن به صفر ولت که کمترین جریان ناشی در آن قرار دارد، می‌توان به حالت کمینه جریان تاریک آشکارساز نزدیک شد.

افزایش تراکم ناخالصی‌ها باعث کاهش جریان نشتی می‌گردد؛ اما انتخاب بیش از حد تراکم و گذشتن از مرز تبه‌گن موجب می‌گردد که پدیده تونل‌زنی در بایاس صفر هم دیده شود. آزمایش‌های انجام شده در این مقاله نشان می‌دهد که انتخاب تراکم در مرز تبه‌گن نیمه‌هادی، باعث ظاهر شدن جریان‌های تونل‌زنی در بایاس‌های معکوس درست بعد از نقطه صفر می‌شود.

منابع

1. L. P. Chen, J. J. Lou, T. H. Liu, Y. M. Pang and S. J. Yang, Evaluation of low dark current InSb photovoltaic detector, solid state electronic, 35, 8 (1992) 1081.
2. F. K. Hopkins, J. T. Boyd, Dark current analysis of InSb photodiode, Infrared phys. 24, 4 (1984) 391.
3. J. T. Wimmers, R. M. Davis, C. A. Niblack and D. S. Smith, SPI 930, 125 (1988).
4. S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, John Wiley and Sons, Inc. (1983).
5. B. G. Streetman, Solid state electronic Devices, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J. (1972).
6. H. Simchi, Optimization of Cooled InSb Detectors, III-V Review, October (2004).
7. H. Simchi, S. Bahreani, M. H Saani, Cleaning InSb Wafers for Manufacturing InSb Detectors, EJP-AP, January (2006).
8. G. Saussorgues, Infrared thermography, Chapman and Hall (1994).
9. M. Daraee, M. Moradi, M. Hajian, M. Rastgoo, M. A. Forghani, Effects of 3H etchant on InSb A and B sides for array fabrication, Electron. Lett. 45, 18 (2009) 957.