تاریخ چاپ: بهار ۱۳۹۰

بررسی عوامل مؤثر در جریان تاریک آشکارساز دیودی مادون قرمز InSb

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

چکیده

این مقاله گزارشی از محاسبه و اندازه‌گیری جریان‌های نشتی فتودیود InSb از نوع p^+-n ساخته شده به روش Mesa است. محاسبات و اندازه‌گیری جریان‌های مختلف نشتی مؤثر در دیود InSb همراه با تغییرات آن با توجه به بایاس اعمالی نشان می‌دهند که در بایاس‌های معکوس نسبتاً کم (تا حدود۳۰۰ 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 نشتی 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 آشکارساز ها در طول موج‌های مادون قرمز محدودهٔ ۳-۵μm است[۶]. در یک آشکارساز، داشتن نسبت سیگنال به‌نویز بالا بسیار مهم است. نویز در یک آشکارساز فتوولتایک ارتباط مستقیمی با جریان تاریک دیود دارد[۳]، عوامل مختلفی تعیین کنندهٔ 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 نشتی بایاس اعمالی به آشکارساز است. میزان جریان نشتی در بایاس صفر ولت کم‌ترین مقدار است و با افزایش بایاس معکوس مقدار آن زیاد می‌شود[۸].

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

$$I_0 = I_d + I_{G-R} + I_s + I_t \qquad (۱)$$

جریان *دیفیوژن*، جریانی حاصل ازحامل‌های اقلیت موجود در دو طرف لبهٔ پیوند با فاصلهٔ یک طول نفوذ حامل است. رابطهٔ (۲) چگالی جریان دیفیوژن را نشان می‌دهد[۵].

$$J_D = \frac{qD_p P_{n_0}}{L_p} + \frac{qD_n n_{p_0}}{L_n} \qquad (۲)$$

واژه‌های کلیدی: فتودیود ایندیوم آنتیموناید، آشکارساز مادون قرمز، جریان تاریک
دریافت ۸۷/۹/۱۲ پذیرش ۸۸/۱۰/۲

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-03]

D_p و L_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_{p_0} تراکم حامل اقلیت در نیمه‌هادی نوع p و p_{n_0} 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 p_{n_0} و n_{p_0} می‌شود که نتیجه آن کاهش جریان است. نکتهٔ مشخصهٔ 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 $p_{n_0} >> n_{p_0}$ است، رابطهٔ چگالی جریان دیفیوژن را می‌توان به‌صورت خلاصه شدهٔ 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 ناحیهٔ تخلیه[۱] است و عوامل بوجود آورنده آن تله‌ها و نقایص کریستالی ناحیه تخلیه است. جریان تولید و بازترکیب در ناحیه تخلیه از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید[۱]:

$$J_{gen} = \frac{qn_iW}{\tau_e} \qquad (۳)$$

W پهنای ناحیهٔ 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]:

$$J_{gen} \propto T^{3/2}\exp\left(-\frac{E_g}{2KT}\right)(V_{bi}-V)^{1/2} \qquad (٤)$$

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

$$V_{bi} = \frac{KT}{q}\ln\left[\frac{N_DN_A}{{n_i}^2}\right] \qquad (۵)$$

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

$$W = \left[\frac{2K_S\varepsilon_0}{q}(V_{bi}-V)\left(\frac{N_A+N_D}{N_AN_D}\right)\right]^{1/2} \qquad (۶)$$

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

۱.depletion

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-03]

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

$$J_{sh} \propto VT^{3/2} \exp(-E_g/2kT) \qquad (۷)$$

کیفیت سطوح نیمه‌هادی و اکسید آندی به‌کار رفته در لبه‌های پیوند، تعیین کنندهٔ 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 قرارگیرد. 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 پدیدهٔ 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 رابطهٔ (۸) نشان داد[۲]:

$$I_T = K_1(V_{bi} - V)^{1/2}\left(\frac{V^2}{T}\right)\exp\left(\frac{-K_2}{(V_{bi}-V)^{1/2}}\right) \qquad (۸)$$

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 پروسهٔ عملی ساخت دیود p^+-n روی زیرلایه InSb نوع n با تراکم ناخالصی ۲×۱۰^{۱۵} cm^{-3} به کمک دیفیوژن حرارتی، ناخالصی Cd را با تراکم ۱×۱۰^{۱۸} 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 CP4A (HNO_3: CH_3-COOH: HF: H_2O at 2:1:1:10) سطح ویفر را آمادهٔ پروسهٔ دیفیوژن می‌کنیم [۷]. تراکم ناخالصی نفوذ داده شده توسط اندازه‌گیری اثر هال به‌صورت دقیق سنجیده می‌شود. دیودهای دیفیوژن شده پس از لیتوگرافی، با تکنیك Mesa و زدایش شیمیایی از هم جدا شده [۹] و با استفاده از اکسید آندی مناطق زدایش شده را اکسید می‌کنیم. مساحت ناحیهٔ حساس دیود ساخته شده پس از برش قطعات، $۱ mm^2$ است.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-03]

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

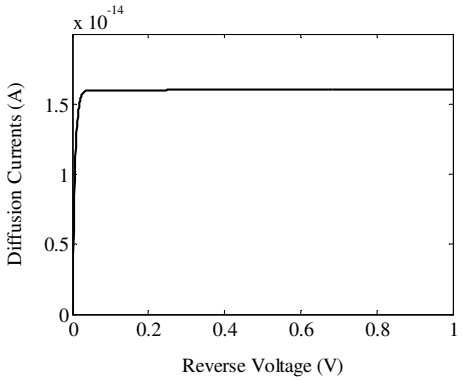
توضیحات و نتایج

با جاگذاری پارامترهای اندازه‌گیری شدهٔ جدول ۱ در رابطهٔ (۲)، میزان جریان دیفیوژن دیود ساخته شده به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$J_D = 1.6\times10^{-19}\times\frac{8\times10^{-3}cm}{8\times10^{-7}s}\left(\frac{10^{18}}{10^{15}}\right) = 1.6\times10^{-12}q/cm^2.s$$

$$i_d = 1.6\times10^{-12}\times1\times10^{-2} \Rightarrow 1.6\times10^{-14}q/s$$

اگر چگالی جریان نشتی دیود تنها حاصل از I_d باشد، طبق رابطهٔ (۲)، منحنی ولت - آمپر دیود به شکل (۱) خواهد بود:



شکل۱. 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 وکاهش تراکم ناخالصی‌ها و عیوب کریستالی زیاد ویفر، باعث افزایش این جریان می‌شود.

برای محاسبهٔ جریان تولید- بازترکیب به مقادیر پتانسیل سد و پهنای ناحیهٔ 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 ناحیهٔ تخلیه در بایاس صفر ۰/۶ μm است؛ از همین رو با توجه به رابطهٔ (۳) مقدار این جریان در بایاس صفر به صورت زیر قابل محاسبه است:

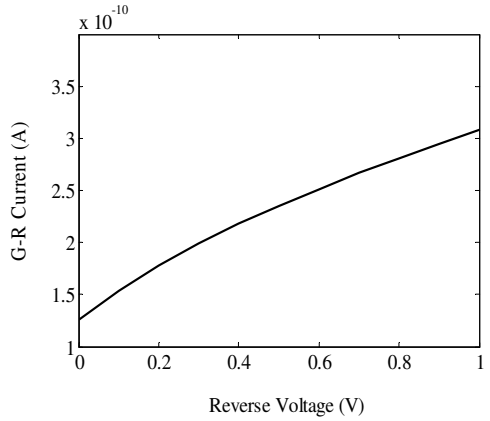
۱.keithley

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-03]

$$J_{gen} = \frac{qn_iW}{\tau_e} = \frac{1.6\times10^{-19}\times1\times10^{9}\times0.6\times10^{-4}}{8\times10^{-7}} = 1.2\times10^{-8}\,q/cm^2.s$$

$$i_{gen} = 1.2\times10^{-8}\times1\times10^{-2} \Rightarrow 1.2\times10^{-10}\,q/s$$

و با توجه به تابعیت این جریان با مجذور ولتاژ اعمالی، طبق رابطهٔ (۳)، منحنی $I_{G\text{-}R}$-V دیود ساخته شده مانند شکل (۲) خواهد بود:



شکل۲. تغییرات جریان تولید- بازترکیب به ازای تغییرات ولتاژ معکوس

رابطهٔ دیگری که عموماً برای جریان تونل‌زنی استفاده می‌شود رابطهٔ (۹) است[۵].

$$J_T = \frac{q^3 \mathrm{E} V}{4\pi^2 h}\sqrt{\frac{2m^*}{E_g}}\exp\left(-\frac{4\sqrt{2m^*E_g^3}}{3qh\mathrm{E}}\right) \qquad (۹)$$

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 تونل‌زنی در دیود از حاصل‌ضرب یک مقدار در یک تابع نمایی به‌دست می‌آید. مشاهده می‌شود 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 تونل‌زنی شروع به افزایش می‌کند.

با جاگذاری مقادیر عددی در رابطهٔ (۹) داریم:

$$J_T = \alpha E V \exp\left(-9\times10^{7}/E\right)$$

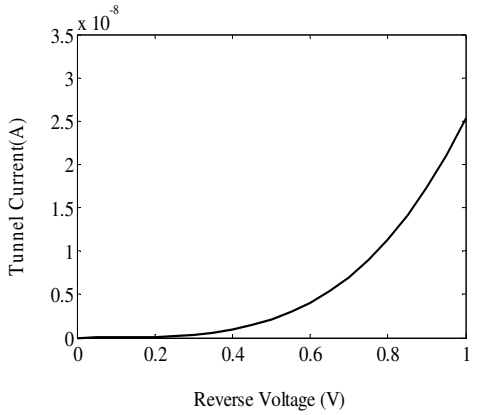
افزایش بایاس اعمالی باعث افزایش E و کاهش مقدار داخل پرانتز می‌شود و با توجه به منفی بودن آن افزایش شدید جریان تونلی را از یک ولتاژ معکوس به بالا داریم. میزان E میدان داخلی را می‌توان مجموع E_0 میدان حاصل از تعادل وE حاصل از اعمال ولتاژ خارجی دانست. E_0را می‌توان از رابطهٔ زیر محاسبه کرد:

$$\mathrm{E}_0 = -\frac{q}{\varepsilon}N_d\ \ x_{n0} \approx 6\times10^{3}\ \ V/cm \qquad (۱۰)$$

x_{n_0} طول ناحیهٔ تخلیه در نیمه‌هادی نوع n و ε ضریب دی الکتریک($K_s\times\varepsilon_0$) است.

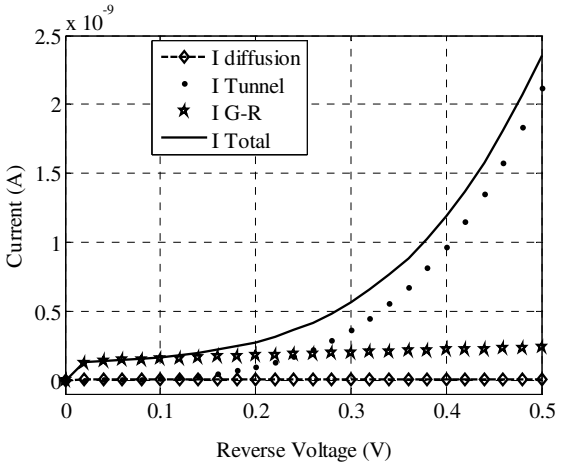
[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-03]

اگرچگالی جریان نشتی دیود تنها حاصل از I_t باشد، طبق رابطهٔ (۸)، منحنی I_t-V دیود به شکل ۳ خواهد بود.



شکل۳. تغییرات جریان تونلزنی به ازای تغییرات ولتاژ معکوس

با توجه به آن‌که جریان نشتی دیود مجموع تمام جریان‌های نشتی می‌باشد (رابطهٔ ۱)، شکل زیر را می‌توان برای جریان‌های دیود مورد نظر ترسیم کرد. نمودار منحنی رسم شده با خط پیوسته، حاصل‌جمع 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].



شکل۴. منحنی‌های شبیه‌سازی شده جریان‌های نشتی دیود n^+-p 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.

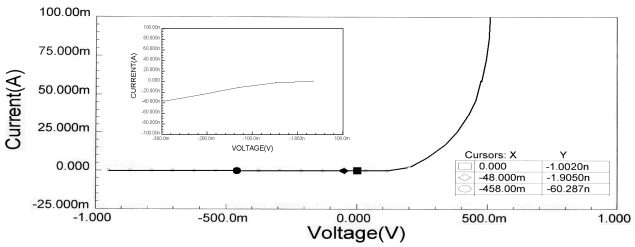
[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-03]

جدول۲، جریان‌های نشتی مؤثر در بایاس صفر را در یک فتودیود InSb از نوع p^+-n بر اساس محاسبات تئوری انجام شده نشان می‌دهد:

جدول۲. جریان‌های نشتی دیود p^+-n در بایاس صفر با توجه به محاسبات تئوری

مجموع جریان‌های نشتی (I_{total})	جریان تونلی (I_t)	جریان شنت (I_s)	جریان تولید- بازترکیب (I_{G-R})	جریان دیفیوژن (I_d)
$\approx 420\ pA$	≈ 0	$\approx 3\times10^{-10}$	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 نشتی مناسب برای ساخت آشکارسازهای با نویز کم نزدیك 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 پدیدهٔ تونل‌زنی، جریان نشتی 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 v ۰/۵ جریان تاریک تقریباً ۶۰ برابر جریان تاریک در بایاس صفر است.



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

نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت نویز در آشکارساز مادون قرمز و ارتباط مستقیم آن با جریان تاریک لازم است تا جریان نشتی را کاهش داد. برای کاهش جریان نشتی باید ویفر مناسبی با کم‌ترین عیوب کریستالی انتخاب کنیم و بعد از انجام پروسه‌های ساخت، با یك اکسید آندی لبه‌های پیوند را بپوشانیم. آن‌چه در کنترل جریان نشتی 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 نشتی در آن قرار دارد، می‌توان به حالت کمینه جریان تاریك آشکارساز نزدیك شد.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-03]

افزایش تراکم ناخالصی‌ها باعث کاهش جریان نشتی می‌گردد؛ اما انتخاب بیش از حد تراکم و گذشتن از مرز تبهگن موجب می‌گردد که پدیدهٔ 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.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-03]