



واحد علوم و تحقیقات

Lecture 12: Bipolar Transistor Fabrication Process (1)

طراحی فرایند ساخت ترانزیستور دو قطبی (۱)

استاد درس: دکتر درویش

□ در این فصل به مطالعه ساختمان مدارهای مجتمع سلیکونی دو قطبی که توسط اتصالات $p-n$ عایق شده‌اند، پرداخته و حداقل فواصل (Minimum spacing) لازم بین قسمت‌های مختلف جانمایی را برای داشتن بهره زیاد تعیین می‌کنیم.

□ این فواصل مینیمم به عوامل مختلفی بستگی دارند از جمله: خواص مواد بکار رفته، ولتاژ کار مدار، خطاهای موجود در بعضی از فرایندهای ساخت.

□ برای درک بهتر مطلب، طراحی جانمایی ترانزیستوری با مشخصات فرایند ذکر شده در جدول (۱) را در نظر می‌گیریم و از قواعد طراحی جدول (۲) که در واقع نتایج فصل‌های قبل است، استفاده می‌کنیم.

تعریف فرایند

جدول (۱): مشخصات فرایند (فرض کنید نفوذ جانبی 0.8% عمق نفوذ عمودی باشد)

بستر	نوع p ، $10 \Omega\text{cm} \pm 20\%$ ، جهت کریستالی (111)
لایه مدفون	$\rho'_s = 40 \Omega/\square$ ، عمق $5.5 \mu\text{m}$ (که $6 \mu\text{m}$ که $0.5 \mu\text{m}$ آن باید خورده شود)
لایه همبافته	$0.5 \Omega\text{cm} \pm 10\%$ ، ضخامت $5 \pm 0.5 \mu\text{m}$
نفوذ بیس	نفوذ بور (نوع p)، $\rho'_s = 200 \Omega/\square$ ، عمق $2 \pm 0.5 \mu\text{m}$
نفوذ امیتر	نفوذ فسفر، نوع n با تراکم سطحی n^+ ، عرض بیس $1 \mu\text{m}$
نفوذ عایق	نفوذ بور p^+ ، $\rho'_s = 5 \Omega/\square$

در مورد لایه مدفون قابل ذکر است که $0.5 \mu\text{m}$ خوردگی برای اطمینان از تمیزی سطح قرص برای مرحله رشد همبافته است.

خوردگی در داخل کوره (Intrinsic Etching): $\text{SiCl}_4 + 2\text{H}_2 \leftrightarrow \text{Si} + 4\text{HCl}$

جدول (۲): قوانین طراحی Ground rules

$8 \times 8 \mu\text{m}$	ابعاد کوچکترین نقش (پنجره) Minimum feature
$10 \mu\text{m}$	حداقل پهنای خطوط فلزی
$10 \mu\text{m}$	حداقل فاصله بین دو نوار فلزی
$8 \mu\text{m}$	حداقل فاصله بین دو نوار فلزی اگر طول نوارها کم باشد
$1 \mu\text{m}$	حداقل فاصله در بدترین حالت
$\pm 1.8 \mu\text{m}$	عدم دقت پهنای خطوط Linewidth Uncertainty
$\pm 4.5 \mu\text{m}$	تولرانس تطبیق نقاب Mask alignment Tolerance
$\pm 5.5 \mu\text{m}$	تولرانس تطبیق دو نقاب متوالی

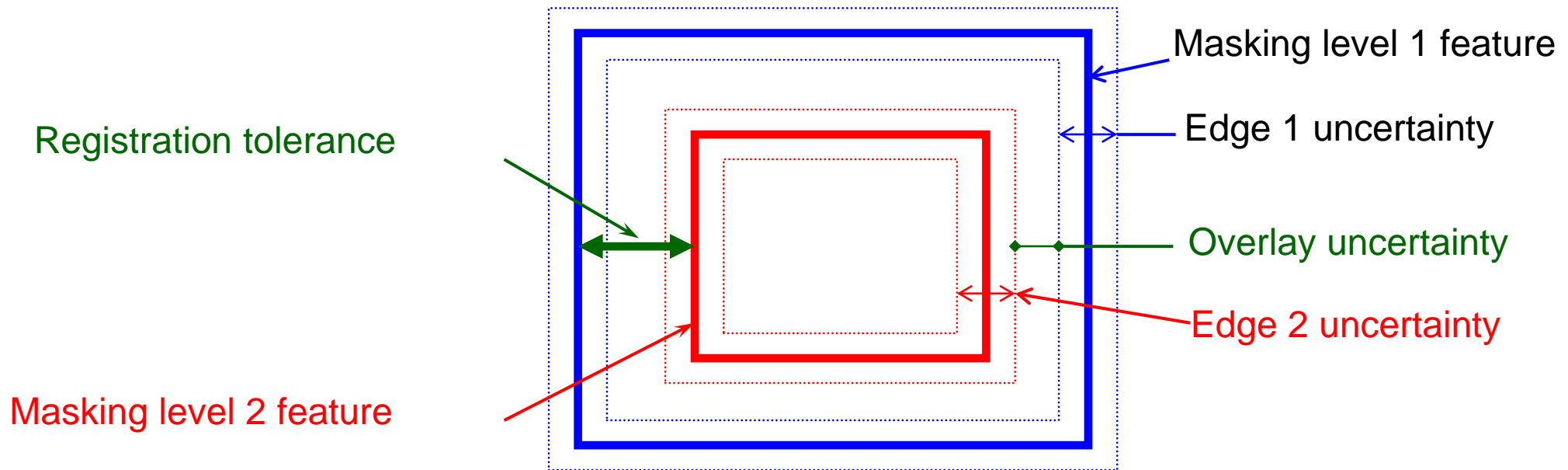
همپوشانی فلز روی کنتاکت لازم نیست اما ابعاد فلز روی کنتاکت را باید به گونه‌ای انتخاب کرد تا از تماس فلز و کنتاکت اطمینان حاصل شود. کنتاکت امیتر باید درون امیتر قرار داده شود.

مولفه‌های تطبیق نقاب عبارتند از:

- | | |
|-----------------------|-----------------------------------|
| $\pm 0.5 \mu\text{m}$ | ۱- تغییرات عرض خطوط روی نسخه کاری |
| $\pm 0.4 \mu\text{m}$ | ۲- جایگذاری و ثبت |
| $\pm 0.1 \mu\text{m}$ | ۳- چاپ نسخه کاری |
| $\pm 1.8 \mu\text{m}$ | ۴- فرایند نقش نگاری |
| $\pm 1 \mu\text{m}$ | ۵- خطای اپراتور |

تولرانس تطبیق نقاب: $\pm 4.5 \mu\text{m}$

تولانس تطبیق نقاب:



□ ابعاد و عبارتهای ذکر شده در جدول (۲) توسط تواناییهای فتولیتوگرافی و محدودیت‌های تحمیل شده بوسیله تکنیک‌های فرایند تعیین می‌شوند. مثلاً کوچکترین نقش به فرایند وابسته است. زیرا به قابلیت باز کردن پنجره‌ای به ابعاد کوچک‌ترین نقش روی لایه اکسیدی به ضخامت مورد نیاز فرایند مربوط می‌شود.

□ در محاسبات این فصل حداقل فواصل جانمایی را برای مدارهای منطقی دیجیتال TTL که با ولتاژ تغذیه مستقیم ۵ ولت کار می‌کنند، بدست می‌آوریم. ضمناً در حالت‌های گذرا، حداکثر ولتاژ بستر-کلکتور و بیس-کلکتور را ۱۰ ولت و حداکثر ولتاژ بایاس معکوس اتصال امیتر-بیس را ۵ ولت فرض می‌کنیم.

فرایند ساخت لایه مدفون

در این بخش به مکانیزم نفوذ لایه مدفون می‌پردازیم. زمان و دمای نفوذ این لایه به ضخامت و مقاومت صفحه‌ای مورد نیاز بستگی دارد. لایه‌های مدفون معمولاً توسط فرایند دو مرحله‌ای نفوذ داده می‌شوند که مرحله پیش‌نشست آن توسط نفوذ گرمایی یا کاشت یونی صورت می‌گیرد. پروفایل حاصل از نفوذ دو مرحله‌ای را به فرم تابع مکمل خطا فرض می‌کنیم.

برای نفوذ لایه مدفون از ناخالصی‌های دارای نفوذ کم استفاده می‌کنیم تا در طول فرایندهای با دمای بالای بعدی، این لایه بطور قابل ملاحظه به اطراف گسترش نیابد. **آرسنیک** و **آنتیموان** انتخاب‌های مناسبی هستند زیرا به کندی در سلیکون نفوذ می‌کنند. چون آرسنیک بهتر در شبکه کریستالی سلیکون قرار می‌گیرد، غالباً از آن استفاده می‌شود.

سعی می‌شود لایه مدفون n^+ و عایق p^+ از هم فاصله داشته باشند، زیرا در اتصال $n^+ - p^+$ جریان نشستی زیاد است.

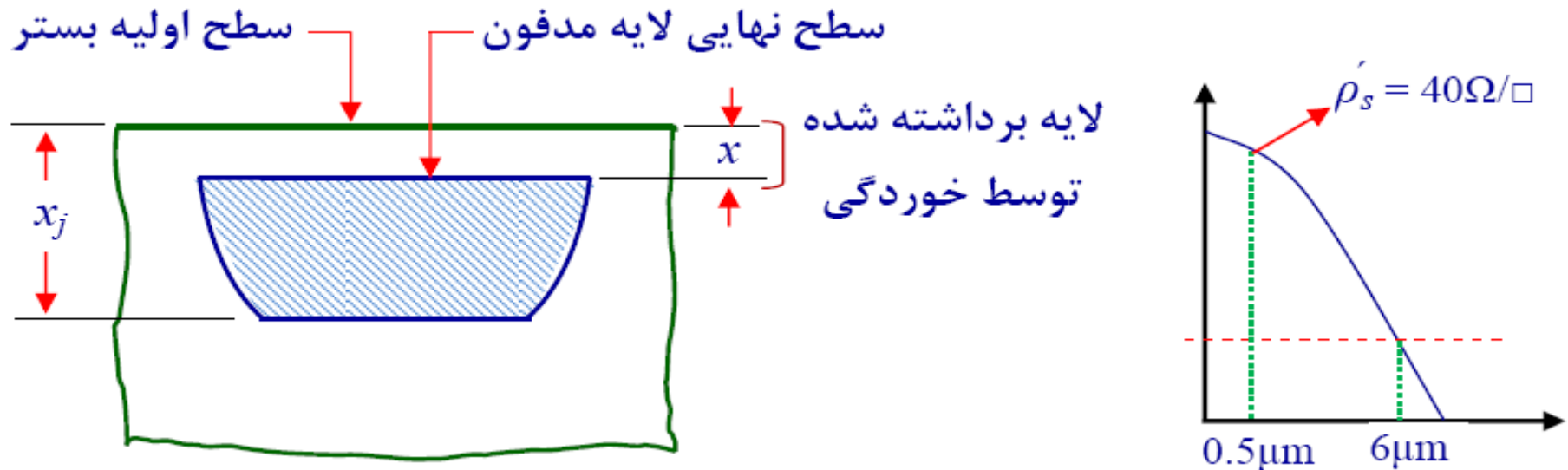
فرایند ساخت لایه مدفون

زمینه نفوذ لایه مدفون، بستر نوع p با مقاومت ویژه $10 \Omega\text{cm} \pm 20\%$ است. در محاسبات طراحی تراکم ناخالصی متناظر با $12 \Omega\text{cm}$ را در نظر می‌گیریم زیرا این مقدار ناخالصی، ناحیه تخلیه بیشتری را نسبت به $8 \Omega\text{cm}$ بدست می‌دهد و در واقع دقت طراحی ما را در بدترین حالت تضمین می‌کند. تراکم ناخالصی بستر N_B متناظر، با استفاده از نمودار مربوط به مقاومت ویژه بر حسب تراکم ناخالصی‌ها در حدود 10^{15}cm^{-3} است.

همانطور که قبلاً ذکر شد، پس از نفوذ لایه مدفون به عمق مطلوب، لازم است که ضخامت تقریبی $0.5 \mu\text{m}$ میکرومتر از سطح سلیکون را توسط HCl برداریم چرا که برای رشد صحیح لایه همبافته بروی لایه مدفون نیاز به سطحی کاملاً تمیز و بدون نقص داریم. برداشتن این لایه که تراکم ناخالصی زیادی دارد، موجب افزایش قابل توجه مقاومت صفحه‌ای لایه مدفون می‌شود و باید آن را در نظر داشت.

فرایند ساخت لایه مدفون

برای محاسبه هدایت ویژه متوسط لایه‌های نفوذ داده شده (با پروفایل‌های گوسی یا تابع مکمل خطا) در زمینه یکنواخت از ناخالصی نوع مخالف می‌توانیم منحنی‌های ایروین را بکار ببریم. نسبت x/x_j که بعنوان پارامتر برای منحنی‌های ایروین تلقی می‌شود، برابر است با: $x/x_j = 0.5/6 = 0.085$



شکل (۱): تعریف متغیرهای x و x_j

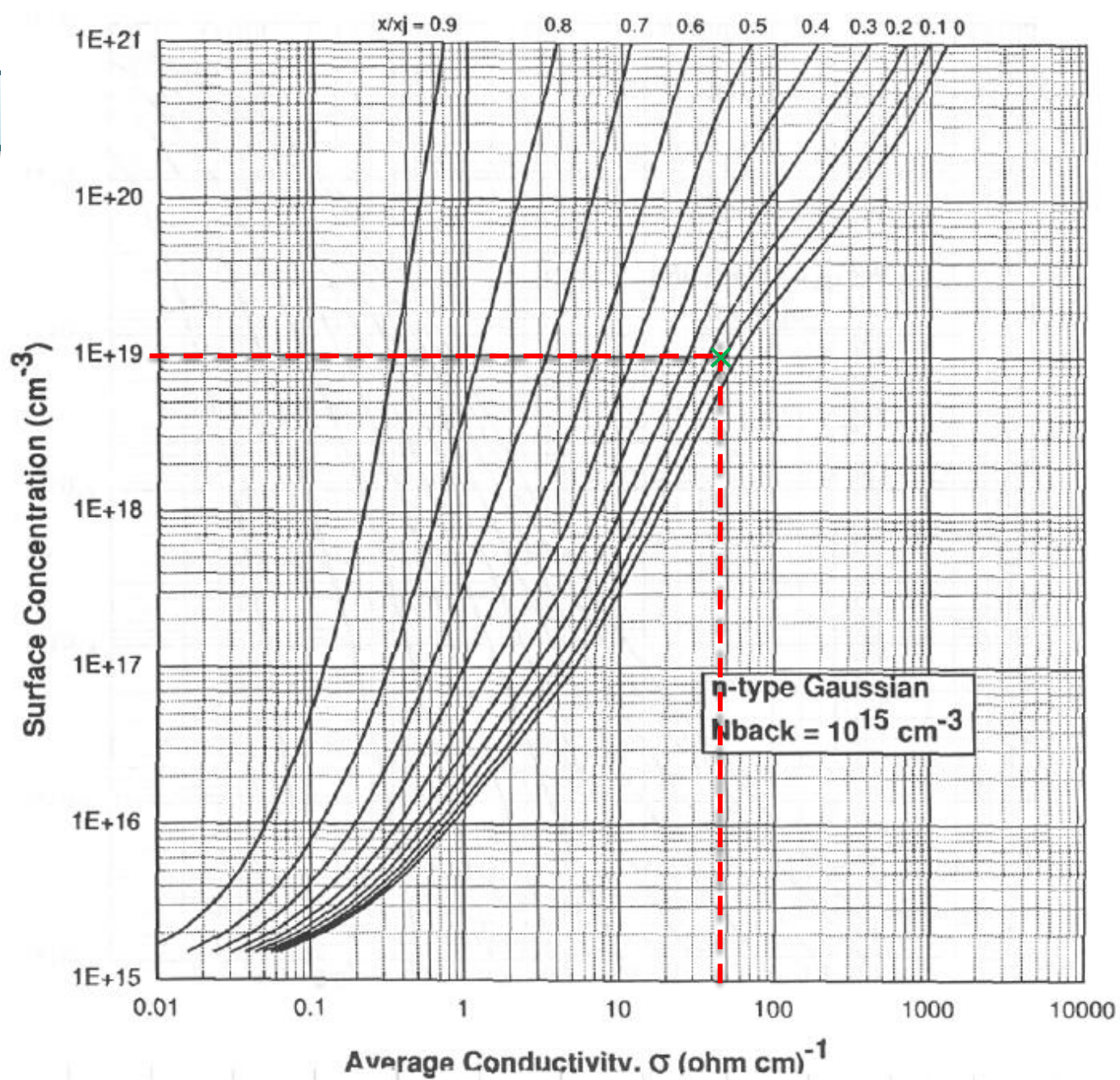
فرایند ساخت لایه مدفون

عمق موثر لایه مدفون پس از خورده شدن $5/5$ میکرومتر خواهد بود. چون $\rho_s = 40 \Omega/\square$ هدایت ویژه متوسط برابر است با:

$$\sigma = \frac{1}{\rho'_s (x - x_j)} = \frac{1}{40 \times 5.5 \times 10^{-4}} = 45 (\Omega\text{cm})^{-1}$$

با توجه به مقدار هدایت ویژه از روی منحنی ابروین، تراکم ناخالصی‌ها در سطح لایه مدفون پس از خوردگی $N_s = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ بدست می‌آید. بنابراین باید تراکم لازم در سطح اولیه بستر را چنان انتخاب کرد که تراکم ناخالصی‌ها در عمق $5/5$ میکرومتر برابر با N_s شود. با فرض این که نفوذ دو مرحله‌ای، معادل نفوذ تابع مکمل خطا به مدت 10^4 s باشد و ضریب نفوذ آرسنیک در سلیکون در دمای فرورو 1200°C حدوداً $2.5 \times 10^{-13} \text{ cm}^2/\text{s}$ باشد، در نتیجه تراکم سطحی عبارت است از:

$$N(x = 0.5 \mu\text{m}, t = 10^4 \text{ s}) = N_s = N_0 \operatorname{erfc}\left[\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right], \quad \Rightarrow \quad N_0 = \frac{10^{19}}{\operatorname{erfc}(0.5)} = 2.1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$$



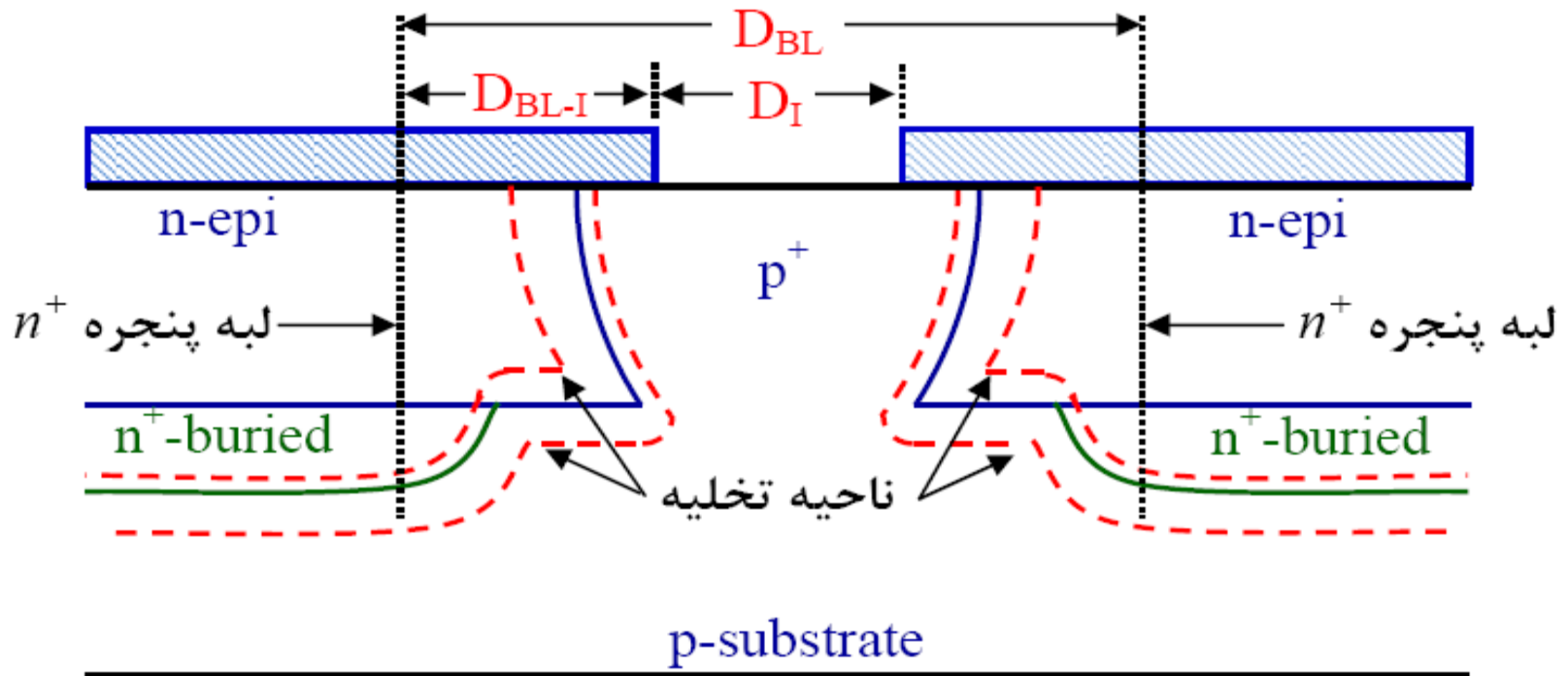
طراحی فرایند برای نفوذ p^+ عایق

پس از نفوذ لایه مدفون، لایه همبافته رشد داده می‌شود. آنگاه نواحی عایق شده مجزایی توسط نفوذ دو مرحله‌ای نوع p^+ با پروفایل تقریبی گوسی تعریف می‌شود.

در مبحث نفوذ دیدیم که بدلیل نفوذ جانبی اتم‌های ناخالصی، مدل یک بعدی فرایند نفوذ در مجاورت لبه‌های پنجره معتبر نیست. نفوذ جانبی نوعاً در حدود 80% نفوذ عمود بر سطح است. در اینجا فرض می‌کنیم که این قاعده در عمق $5\mu\text{m}$ میکرومتر زیر سطح اولیه نیز صادق باشد. در نتیجه نفوذ جانبی موثر لایه مدفون در این حالت $0.8 \times (6 - 0.5) = 4.4\mu\text{m}$ خواهد بود.

در شکل (۲)، دو لایه مدفونی که در نواحی عایق شده مختلفی قرار دارند را مشاهده می‌کنید. این دو لایه توسط ناحیه نفوذ داده شده نوع p^+ با مقاومت صفحه‌ای نوعی 5 اهم بر مربع از یکدیگر جدا شده‌اند.

طراحی فرایند برای نفوذ p^+ عایق



شکل (۲): تعریف حداقل فاصله بین لایه مدفون و نفوذ عایق

معمولاً عمق نفوذ عایق را تقریباً ۲۵٪ بیشتر از عمق ناحیه همبافته می‌گیرند تا از گسترش نواحی تخلیه در زیر نفوذ عایق و در نتیجه اتصال آنها بهم جلوگیری شود.

طراحی فرایند برای نفوذ p^+ عایق

تراکم ناخالصی لایه همبافته در بدترین حالت (ضخامت ۵/۵ میکرومتر و مقاومت ویژه $0.6 \Omega\text{cm}$) با استفاده از نمودار مربوط به مقاومت ویژه بر حسب تراکم ناخالصی‌ها، $1.1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ خواهد بود. لذا تراکم ناخالصی‌های پروفایل نفوذ عایق در عمق $5.5 \times 1.25 = 6.88 \mu\text{m}$ بایستی با تراکم لایه همبافته مساوی شود.

هدایت ویژه متوسط برابر است با:

$$\sigma = \frac{1}{\rho'_s(x - x_j)} = \frac{1}{5 \times 6.88 \times 10^{-4}} = 290 (\Omega\text{cm})^{-1}$$

تراکم سطحی نهایی (پس از مرحله فرورو) ناحیه عایق p^+ ، N_{02} توسط منحنی ابروین با توجه به $N_{bc} = 1.1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ و $x/x_j = 0$ در حدود $1.1 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ بدست می‌آید. چون اتصالی در زیر پروفایل نفوذ داده شده، تشکیل نمی‌شود، مقادیر فوق تا اندازه‌ای خطا به‌مراه دارند اما برای منظور ما از دقت کافی برخوردارند.

طراحی فرایند برای نفوذ p^+ عایق

برای سهولت فرض می‌کنیم که هر دو مرحله پیش‌نشست و فرورو در دمای 1200°C انجام شوند. پروفایل نفوذ دو مرحله‌ای توسط معادله زیر توصیف می‌شود:

$$N(x, t_p, t_d) = \frac{2N_{01}}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} \frac{\exp(-y^2)}{\sqrt{\beta}} \operatorname{erf}(\alpha y) dy$$

تراکم سطحی نهایی پس از دو مرحله نفوذ عبارت است از:

$$\Rightarrow N_{02} = N(0, t_p, t_d) = \frac{2N_{01}}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{D_p t_p}{D_d t_d} \right)^{1/2}$$

که N_{01} تراکم ناخالصی است که در سطح ثابت نگه داشته می‌شود (حد حلالیت در پیش‌نشست).

بدلیل نیاز به تراکم سطحی نهایی زیاد، N_{01} را حد حلالیت در جامد بور در سلیکون برای دمای پیش‌نشست در نظر می‌گیریم. این مقدار با توجه به منحنی حد حلالیت $4 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ بدست می‌آید (در دمای 1200°C).

طراحی فرایند برای نفوذ p^+ عایق

بدلیل تساوی دماهای پیش‌نشست و فرورو، $D_p = D_d$ خواهد بود.
بنابراین برای زمان‌های پیش‌نشست و فرورو خواهیم داشت:

$$\alpha = \left(\frac{D_p t_p}{D_d t_d} \right)^{1/2} = \left(\frac{t_p}{t_d} \right)^{1/2}, \quad \tan^{-1} \alpha = \frac{\pi}{2} \left(\frac{1.1 \times 10^{20}}{4 \times 10^{20}} \right) = 0.432 \text{ rad}$$

$$\alpha = \tan(0.432) = 0.461, \quad \Rightarrow \quad t_p = \alpha^2 t_d = (0.21) t_d$$

تراکم ناخالصی‌های $N(x, t_p, t_d)$ در عمق تقریباً $7 \times 10^{-4} \text{ cm}$ بایستی $1.1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ باشد. در نتیجه:

$$N(x, t_p, t_d) \Big|_{x=7 \mu\text{m}} = 1.1 \times 10^{16} = \frac{2N_{01}}{\sqrt{\pi}} \int_{\sqrt{\beta}}^{\infty} \exp(-y^2) \operatorname{erf}(\alpha y) dy$$

$$\Rightarrow \int_{\sqrt{\beta}}^{\infty} \exp(-y^2) \operatorname{erf}(\alpha y) dy = 2.44 \times 10^{-5}$$

طراحی فرایند برای نفوذ p^+ عایق

با استفاده از جداول مربوط به انتگرال فوق، با برون یابی مقادیر جدول انتگرال، پارامتر β تقریباً 9.2 می‌شود. از طرف دیگر داریم:

$$\beta = \frac{x^2}{4D(t_p + t_d)} \Big|_{x=7 \mu m} = 9.2$$

در دمای 1200°C ، $D=2.8 \times 10^{-12} \text{ cm/s}$ و در نتیجه:

$$\begin{cases} t_p + t_d = 4.7 \times 10^3 \text{ s} \\ t_p = (0.21)t_d \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} t_p = 825 \text{ s} \\ t_d = 3.9 \times 10^3 \text{ s} \end{cases}$$

توجه کنید محاسباتی که تاکنون برای لایه مدفون و نفوذ عایق انجام دادیم به منظور درک بهتر مطلب بود و معمولاً برای محاسبه فواصل جانمایی، نیازی به این کار نیست.

نقاب‌های لایه مدفون و عایق

اکنون به بررسی حداقل فاصله مجاز بین مرزهای نقش‌های روی نقاب لایه مدفون و نقاب نفوذ عایق می‌پردازیم. با مراجعه به شکل (۲) دیده می‌شود که فاصله بین لایه مدفون و عایق دارای اهمیت زیادی است. هدف ما، محاسبه حداقل فاصله مجاز بین نقش‌های روی نقاب لایه مدفون و نقش‌های متناظر آن روی نقاب عایق است، به گونه‌ای که جریان نشتی اتصال عایق کننده حتی الامکان کم باشد.

D_{BL-I} : فاصله بین پنجره نفوذ عایق با پنجره نفوذ لایه مدفون

$D_{BL-I} =$ نفوذ جانبی p^+ + نفوذ جانبی لایه مدفون + سهم لایه همبافته از عرض ناحیه تخلیه بین p^+ و همبافته + تلرانس تطبیق نقاب + حداقل فاصله در بدترین شرایط

قبلاً نفوذ جانبی لایه مدفون را محاسبه کردیم ($4.4\mu\text{m}$)، نفوذ جانبی عایق p^+ تقریباً برابر با $0.8 \times 6.88 = 5.5\mu\text{m}$ خواهد بود.

نقاب‌های لایه مدفون و عایق

برای تعیین عرض ناحیه تخلیه اتصال عایق از منحنی‌های لورنس-وارنر استفاده می‌کنیم. این منحنی‌ها برای سلیکون و ژرمانیم داده شده‌اند.

هر دسته از این منحنی‌ها برای محدوده مشخصی از N_B/N_S داده شده‌اند که در آن N_B تراکم ناخالصی‌های زمینه و N_S تراکم سطحی است. در این مثال زمینه همان لایه همبافته است در نتیجه $N_B=1.1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ و برای ناحیه عایق $N_S=N_{O2}=1.1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. بنابراین $N_B/N_S=10^{-4}$.

با ولتاژ معکوس ۱۰ ولت داریم: $V/N_B \approx 10^{-15} \text{ V/cm}^{-3}$. حال براساس نسبت N_B/N_S دسته منحنی مناسب لورنس-وارنر را انتخاب می‌کنیم.

عرض کل ناحیه تخلیه را $1/6$ میکرون بدست آورده و a_1/a_{total} برابر با 0.36 بدست خواهد آمد. a_1 عرض ناحیه تخلیه در قسمت با تراکم بیشتر است. بنابراین در حدود 1 میکرون از ناحیه تخلیه در لایه همبافته قرار می‌گیرد. در نهایت D_{BL-I} برابر خواهد بود با:

$$D_{BL-I} = 4/4 + 5/5 + 1 + 4/5 + 1 = 16/4 \approx 17 \mu\text{m}$$

نقاب‌های لایه مدفون و عایق

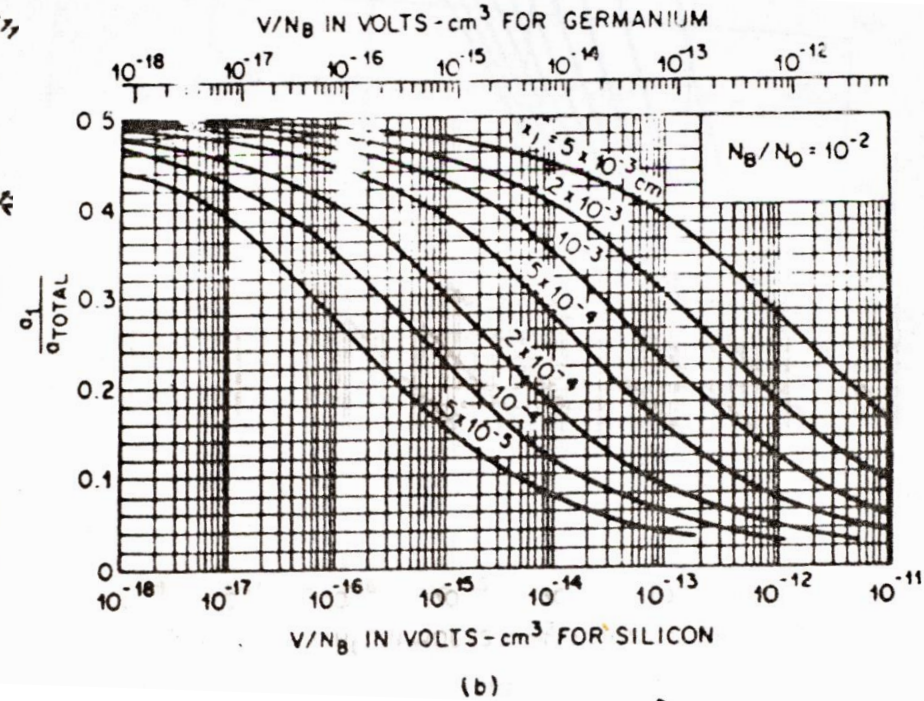
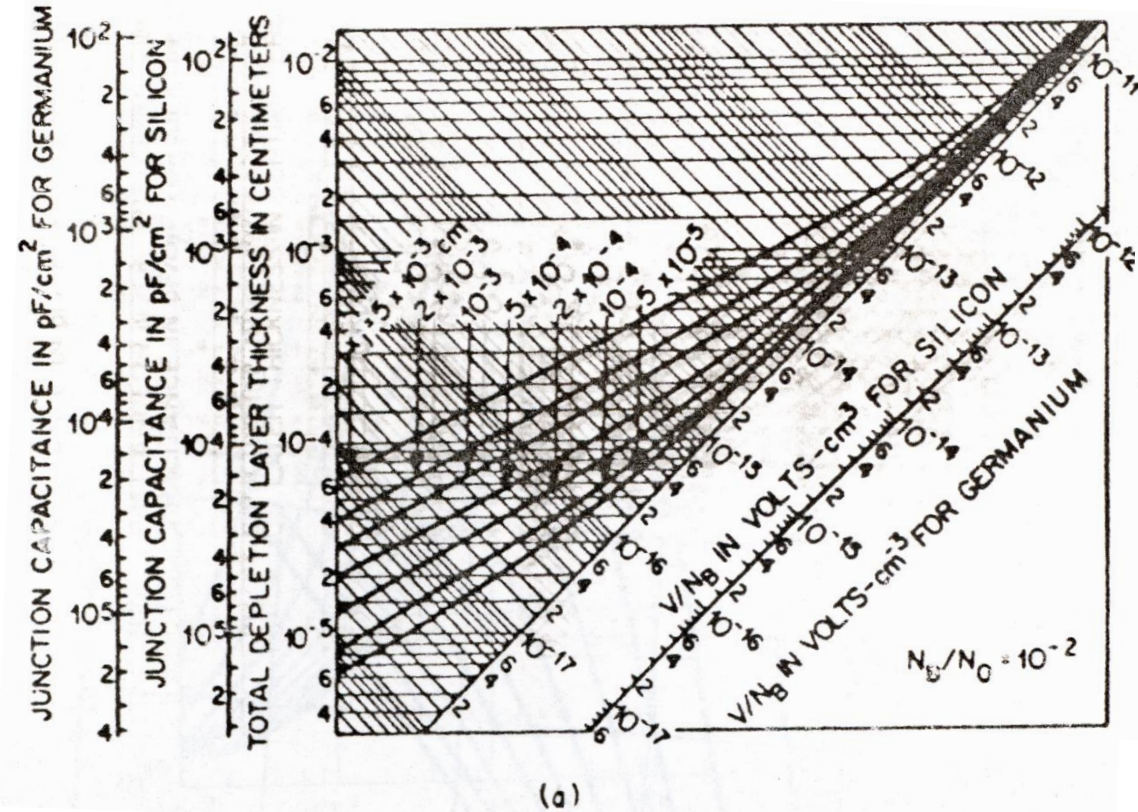
از شکل (۲) دیده می‌شود که عامل تعیین کننده حداقل فاصله بین دو لایه مدفون مختلف، فاصله مدفون تا عایق است و داریم: $D_{BL} = D_I + 2D_{BL-I}$. اگر حداقل عرض یک پنجره در نقاب گذاری اکسید **۸ میکرون** باشد، آنگاه $D_{BL} \approx 41 \mu m$ خواهد شد.

تنظیم و تطبیق نقاب عایق نسبت به لایه مدفون تا حدودی مشکل است. زیرا هنگام خورده شدن سطح قبل از رشد همبافته، تمامی علایم تطبیق از بین می‌رود. برای حل این مساله تطبیق را به کمک نور مادون قرمز (**Infrared illumination**) انجام می‌دهند. زیرا لایه مدفون حاوی ناخالصی آرسنیک چندین قله تضعیف (**Attenuation peaks**) شناخته شده در نوار مادون قرمز در طول کمتر از ۱۰ میکرون بوجود می‌آورد.

یعنی مکان‌هایی از شبکه که آرسنیک وجود دارد، روشن و بقیه جاها خاموش می‌ماند.

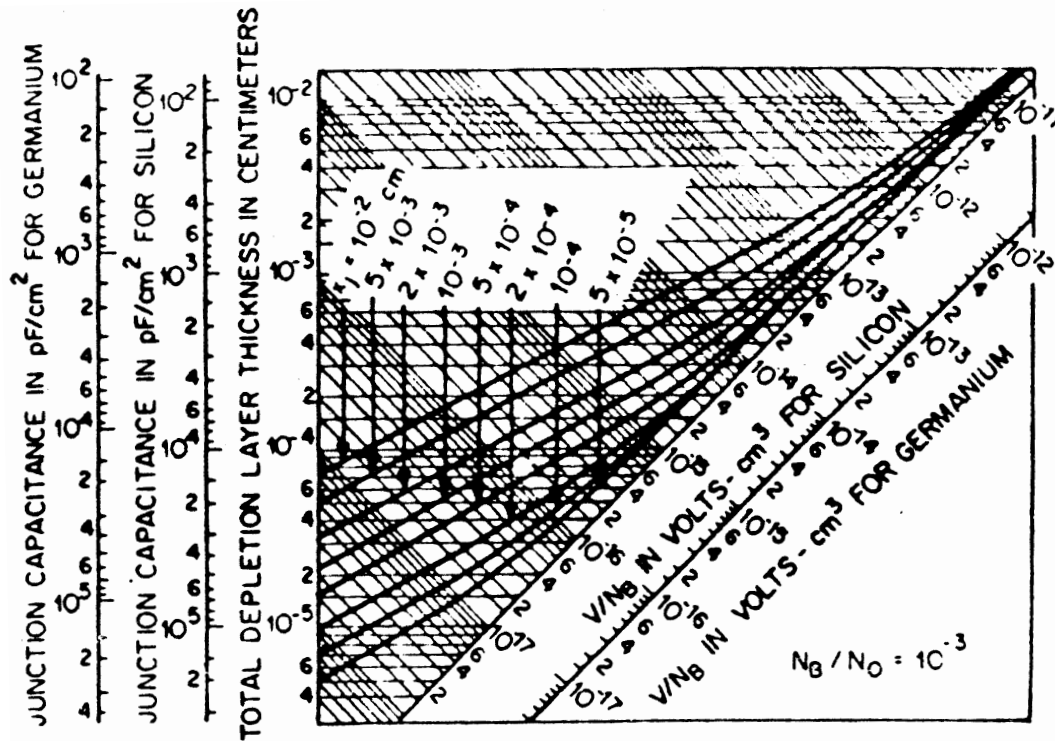
آخرین نکته این است که پنجره‌های نفوذ عایق را در طول نفوذ بیس مجدداً باز می‌کنیم تا تراکم ناخالصی P در روی سطح را افزایش دهیم. ضرورت این کار از امکان خالی شدن سطح از ناخالصی ناشی می‌شود که در نتیجه توزیع مجدد ناخالصی‌ها در طول فرایندهای اکسیداسیون حاصل می‌شود.

منحنی‌های لورنس-وارنر

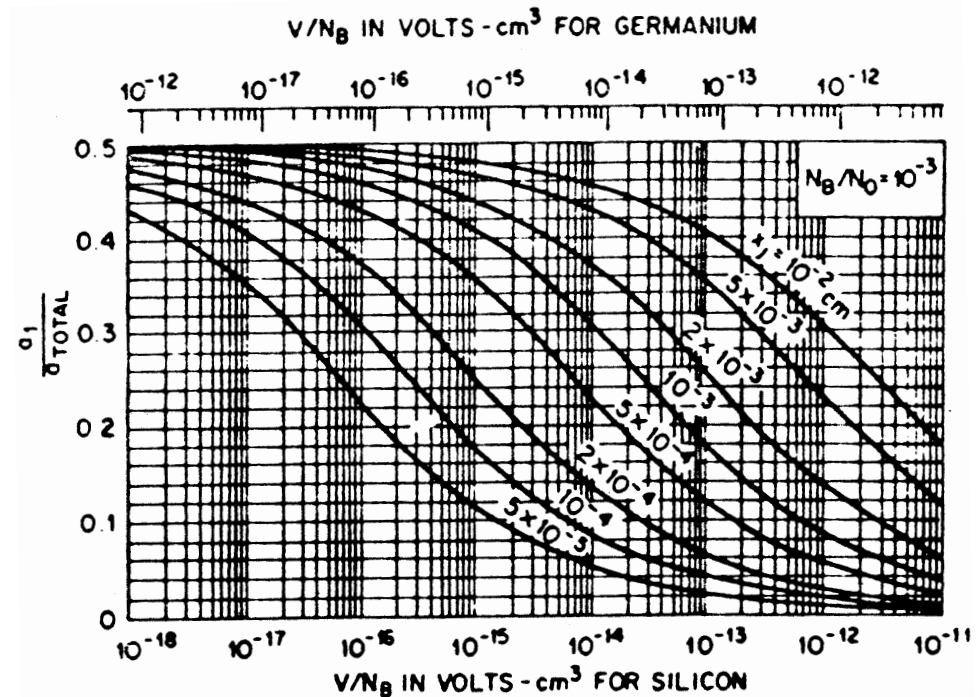


الف- ضخامت کل ناحیه تخلیه و خازن بر واحد سطح بر حسب V/N_B و پارامتر عمق اتصال برای پروفایل گوسی با N_B/N_0 در محدوده 3×10^{-2} تا 3×10^{-3} ، **ب-** نسبت عرض ناحیه تخلیه در طرفی از اتصال که به سطح نزدیک‌تر است به کل ناحیه تخلیه بر حسب V/N_B .

منحنی‌های لورنس-وارنر



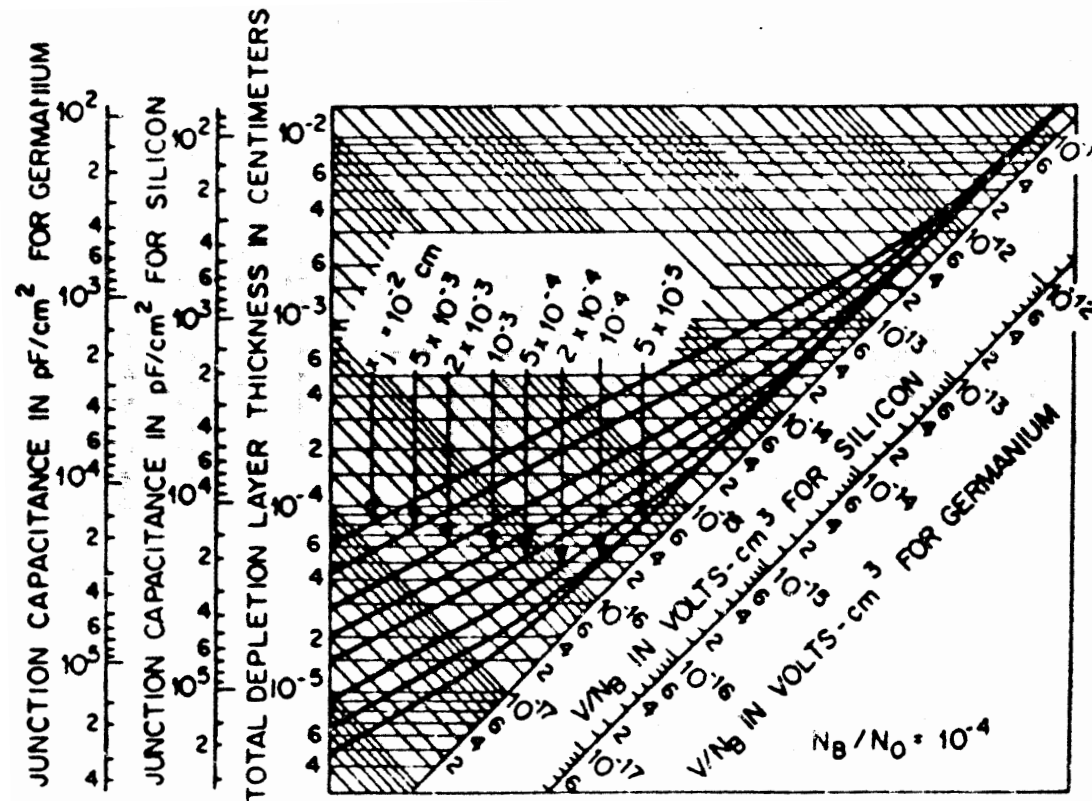
(a)



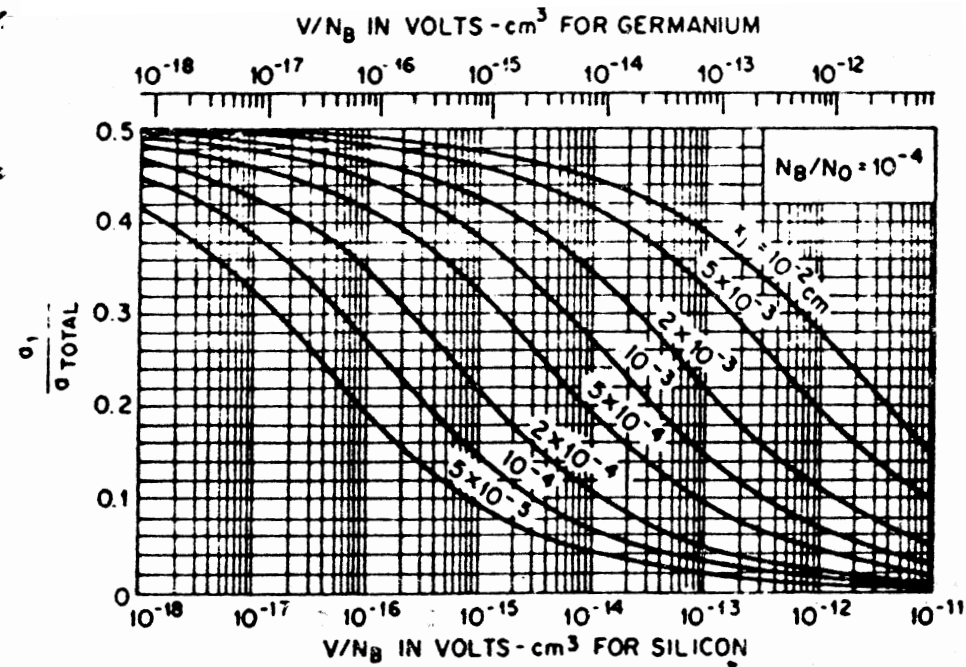
(b)

الف- ضخامت کل ناحیه تخلیه و خازن بر واحد سطح بر حسب V/N_B و پارامتر عمق اتصال برای پروفایل گوسی با N_B/N_0 در محدوده 3×10^{-4} تا 3×10^{-3} ، **ب-** نسبت عرض ناحیه تخلیه در طرفی از اتصال که به سطح نزدیک‌تر است به کل ناحیه تخلیه بر حسب V/N_B .

منحنی‌های لورنس-وارنر



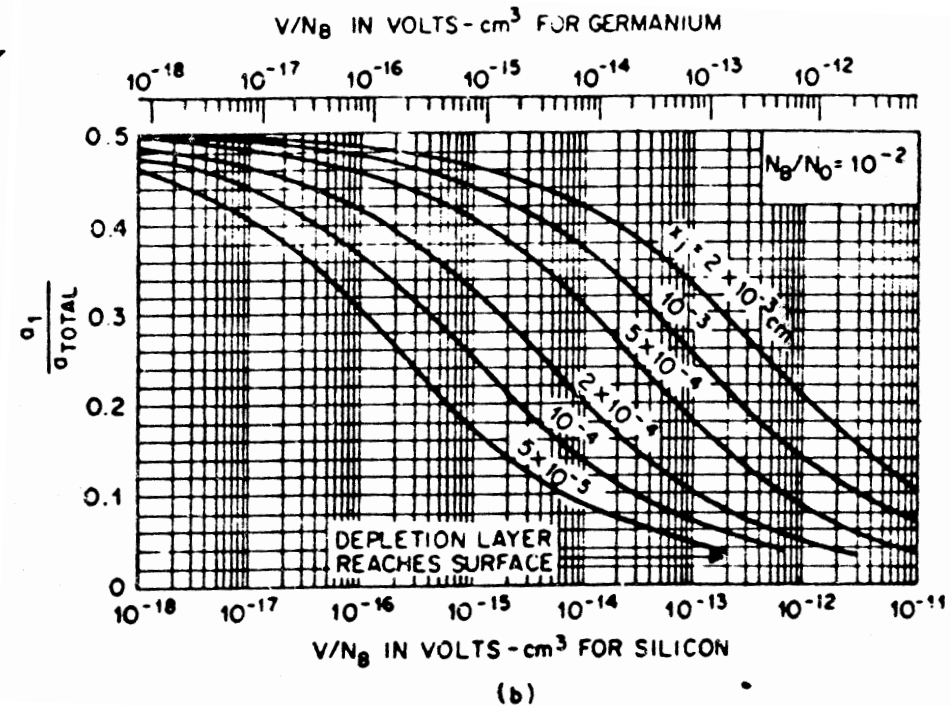
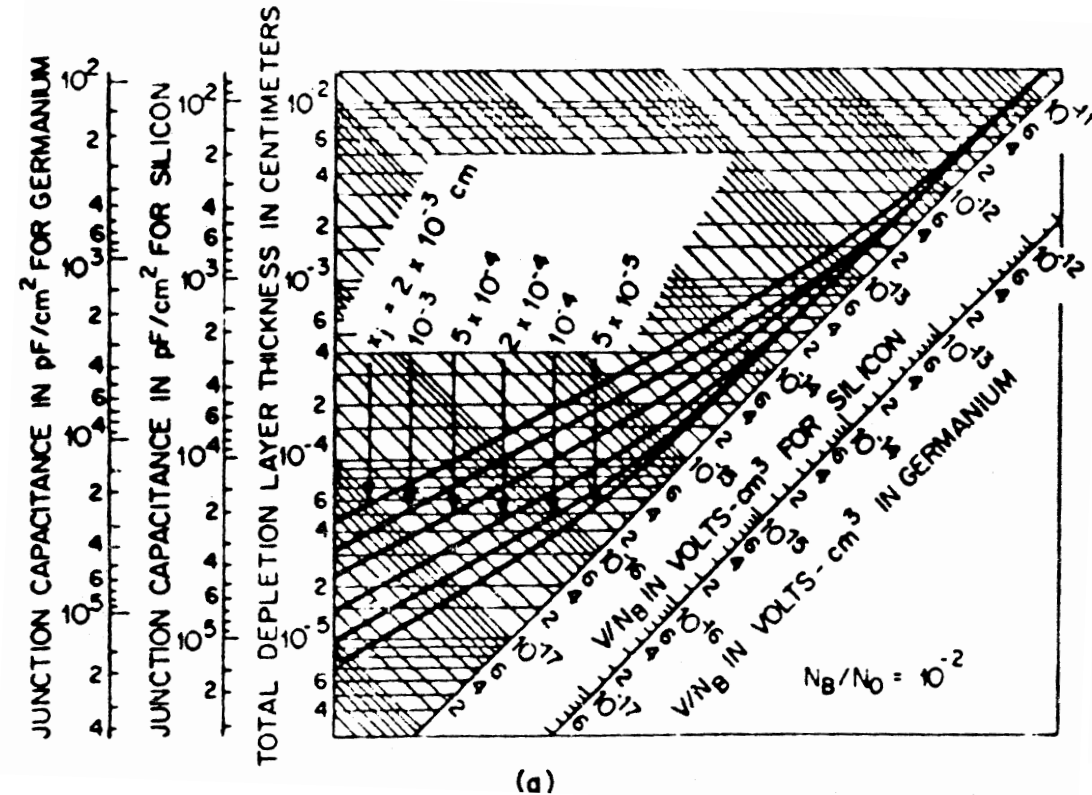
(a)



(b)

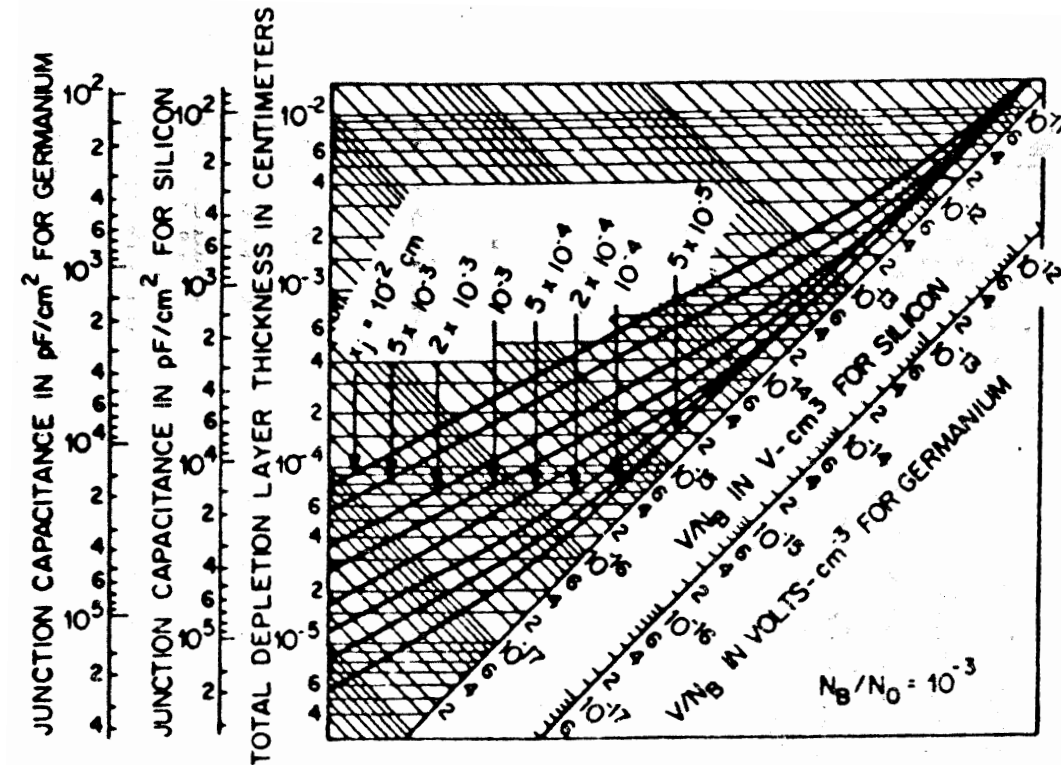
الف- ضخامت کل ناحیه تخلیه و خازن بر واحد سطح بر حسب V/N_B و پارامتر عمق اتصال برای پروفایل گوسی با N_B/N_0 در محدوده 3×10^{-5} تا 3×10^{-4} ، **ب-** نسبت عرض ناحیه تخلیه در طرفی از اتصال که به سطح نزدیک‌تر است به کل ناحیه تخلیه بر حسب V/N_B .

منحنی‌های لورنس-وارنر

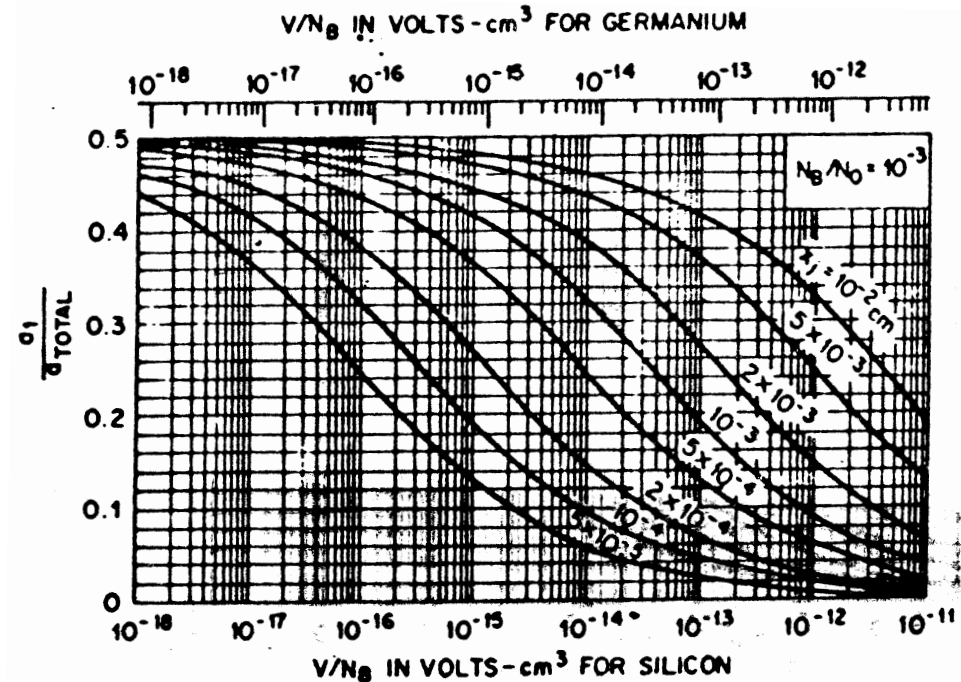


الف- ضخامت کل ناحیه تخلیه و خازن بر واحد سطح بر حسب V/N_B و پارامتر عمق اتصال برای پروفایل $erfc$ با N_B/N_0 در محدوده 3×10^{-3} تا 3×10^{-2} ، **ب-** نسبت عرض ناحیه تخلیه در طرفی از اتصال که به سطح نزدیک‌تر است به کل ناحیه تخلیه بر حسب V/N_B .

منحنی‌های لورنس-وارنر



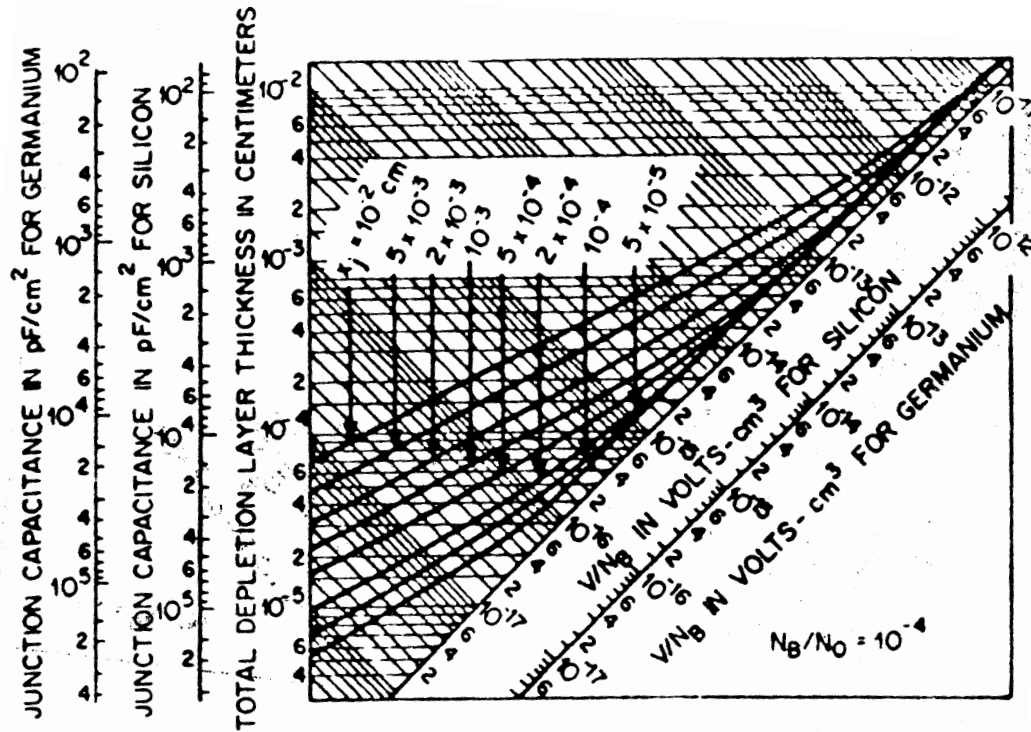
(a)



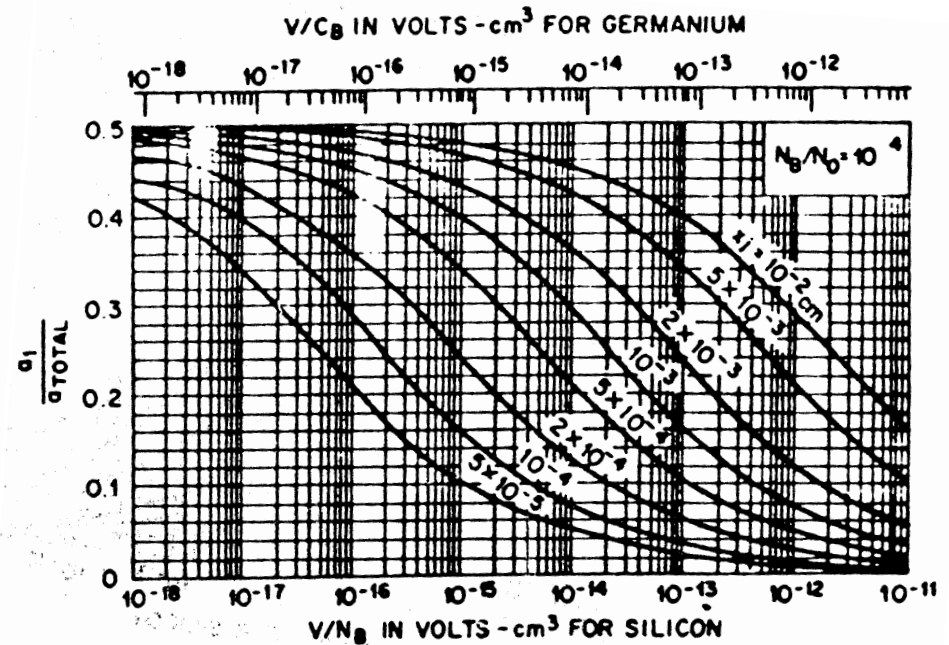
(b)

الف- ضخامت کل ناحیه تخلیه و خازن بر واحد سطح بر حسب V/N_B و پارامتر عمق اتصال برای پروفایل erfc با N_B/N_0 در محدوده 3×10^{-4} تا 3×10^{-3} ، ب- نسبت عرض ناحیه تخلیه در طرفی از اتصال که به سطح نزدیک‌تر است به کل ناحیه تخلیه بر حسب V/N_B .

منحنی‌های لورنس-وارنر



(a)



(b)

الف- ضخامت کل ناحیه تخلیه و خازن بر واحد سطح بر حسب V/N_B و پارامتر عمق اتصال برای پروفایل erfc با N_B/N_0 در محدوده 3×10^{-5} تا 3×10^{-2} ب- نسبت عرض ناحیه تخلیه در طرفی از اتصال که به سطح نزدیک تر است به کل ناحیه تخلیه بر حسب V/N_B .

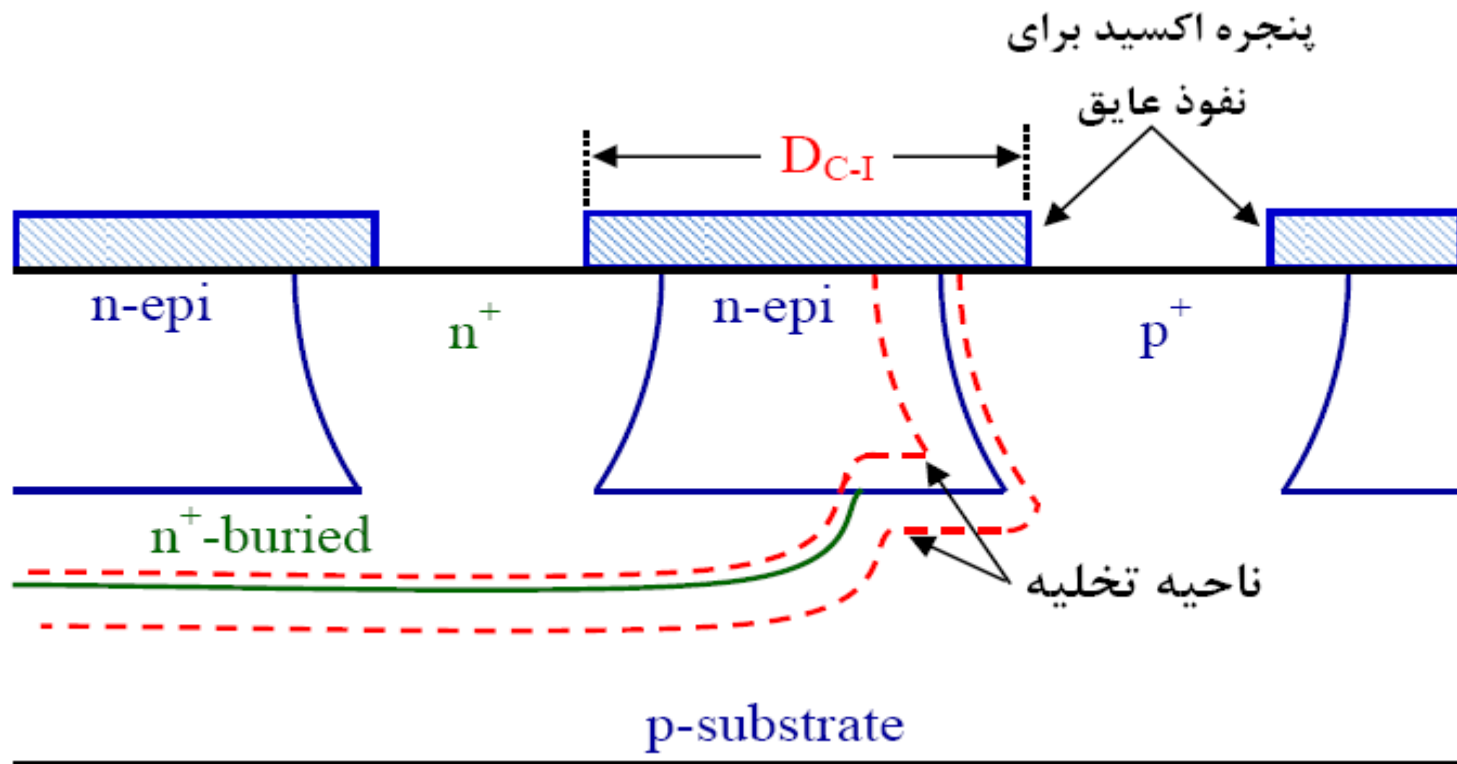
فاصله لایه عایق تا کلکتور عمیق

برای کم کردن مقاومت بین کنتاکت خارجی کلکتور و ناحیه فعال کلکتور از نفوذ کلکتور عمیق استفاده می‌شود. کم شدن این مقاومت در کاهش ولتاژ اشباع ترانزیستور و نیز وابستگی کمتر این ولتاژ به جریان بار در مدارهای منطقی دیجیتال نقش مهمی دارد.

نفوذ کلکتور عمیق، نفوذ دیگری است که برای رفع مشکل فوق برای رسانیدن کلکتور به لایه مدفون در لایه همبافته ایجاد می‌شود. فرض می‌کنیم پروفایل این نفوذ گوسی با مقاومت صفحه‌ای نوعی $5\Omega/\square$ باشد. کلکتور عمیق توسط فرایند نفوذ دو مرحله‌ای با زمان فروروی نسبتاً طولانی صورت می‌پذیرد. در اینجا نیز عمق کلکتور عمیق را $1/2$ برابر ضخامت لایه همبافته می‌گیریم. در این صورت هدایت ویژه متوسط آن برابر است با:

$$\sigma = \frac{1}{\rho'_s(x - x_j)} = \frac{1}{5 \times 1.2 \times 5.5 \times 10^{-4}} = 303 (\Omega\text{cm})^{-1}$$

فاصله لایه عایق تا کلکتور عمیق



شکل (۳): ارتباط میان فواصل مربوط به نفوذهای کلکتور عمیق و عایق

با توجه به منحنی ابروین تراکم ناخالصی‌ها در سطح، $N_S = 6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ خواهد شد. (استفاده از منحنی‌های ابروین خطای کمی در بردارد. زیرا این منحنی‌ها زمانی معتبرند که زمینه دارای هدایت نوع مخالف باشد که در این حالت چنین شرطی برقرار نیست.)

فاصله لایه عایق تا کلکتور عمیق

تمرین ۱: مدت زمان نفوذهای پیش‌نشست و فرورو را در این حالت بدست آورید (مشابه روش نفوذ عایق).

نفوذ جانبی کلکتور عمیق با عمق $6/6$ میکرون برابر است با: $0/8 \times 6/6 = 5/3$ میکرون

نقاب نفوذ کلکتور نسبت به پنجره اکسید نفوذ عایق تنظیم می‌شود. حداقل فاصله بین نقاب‌های نفوذ کلکتور و نفوذ عایق را باید به گونه‌ای انتخاب کرد که نفوذ کلکتور عمیق کاملاً با لایه مدفون تماس داشته باشد. همچنین از اتصال $p-n$ بین لایه‌های دارای ناخالصی زیاد جلوگیری شود. اگر چنین اتصالی تشکیل شود، جریان نشتی اتصال $p^+ - n^+$ زیاد خواهد بود که مطلوب نیست.

توجه کنید که نفوذ کلکتور عمیق ناحیه تخلیه‌ای به‌مراه ندارد زیرا اطراف آن را لایه همبافته نوع n در بر گرفته است.

D_{C-I} = نفوذ جانبی کلکتور عمیق + نفوذ جانبی عایق + سهم لایه همبافته از عرض ناحیه تخلیه بین p^+ و همبافته + تفرانس تطبیق نقاب + حداقل فاصله در بدترین شرایط

فاصله لایه عایق تا کلکتور عمیق

$$D_{BL-I} = 5/3 + 5/5 + 1 + 4/5 + 1 = 17/3 \approx 18 \mu\text{m}$$

محاسبه جریان نشتی:

$$I_{gen} = \frac{Aqn_iW}{2\tau_0}$$

که در آن W عرض ناحیه تخلیه و τ_0 طول عمر حامل‌ها است. که بصورت زیر قابل محاسبه‌اند:

$$W = \left[2 \frac{\varepsilon}{q} (V_{bi} - V) \frac{1}{N_A} \right]^{1/2}, \quad \tau_0 = \frac{\tau_{ref}}{1 + N_A/N_{ref}}$$

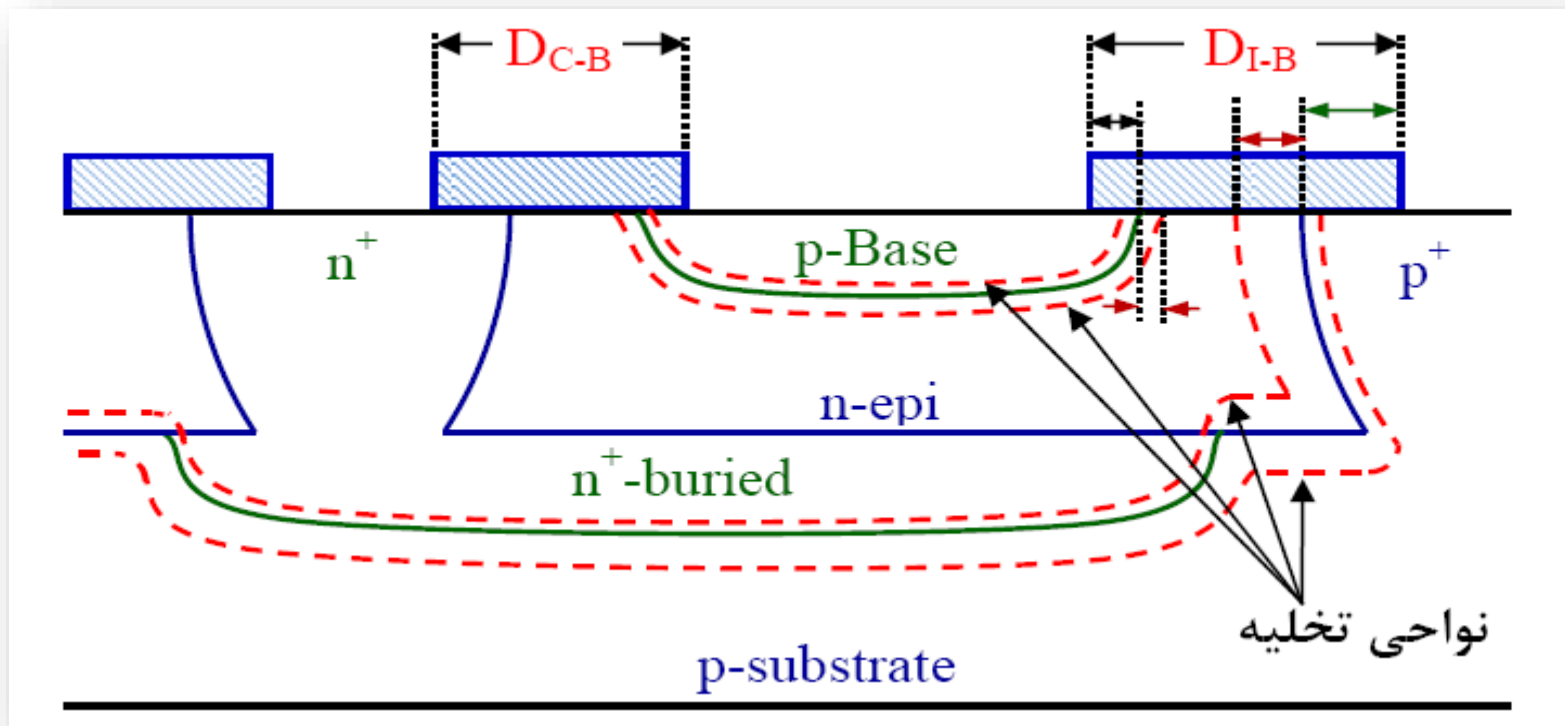
در نرم افزار SEDAN: $N_{ref} = 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ و $\tau_{ref} = 5 \times 10^{-7} \text{ s}$

$$I_{gen} \propto \frac{[1/N_A]^{1/2}}{[1/N_A]} \propto [N_A]^{1/2} \quad \text{در نتیجه:}$$

بنابراین هر چه تراکم بیشتر باشد، جریان نشتی بیشتر است.

فواصل نفوذ بیس

حال به بررسی حداقل فاصله بین نقاب نفوذ بیس و نقاب‌های نفوذ عایق و نفوذ کلکتور عمیق می‌پردازیم. این ارتباط با علائم D_{I-B} و D_{C-B} نشان داده شده است.



شکل (۴): ارتباط بین فواصل مربوط به نفوذ بیس با نفوذهای کلکتور عمیق و عایق

فواصل نفوذ بیس

اصول و قوانین محاسبه این فواصل مشابه حالت‌های قبل است. علامت روی نقاب نفوذ بیس، نسبت به علامت روی نقاب نفوذ عایق تنظیم می‌شود. نقاب نفوذ کلکتور عمیق نیز در فرایند مستقل دیگری نسبت به نقاب نفوذ عایق تنظیم می‌شود. بنابراین در مورد فاصله بین کلکتور عمیق و بیس با تِلرانس تطبیق دو نقاب نیاز داریم.

هدایت ویژه ناحیه بیس با ضخامت $2/5$ میکرون و مقاومت صفحه‌ای 200 اهم بر مربع برابر است با:

$$\sigma = \frac{1}{\rho'_s(x - x_j)} = \frac{1}{200 \times 2.5 \times 10^{-4}} = 20 (\Omega \text{cm})^{-1}$$

با مراجع به منحنی‌های ایروین، تراکم سطحی N_S ، نفوذ گوسی نوع p در زمینه نوع n با تراکم ناخالصی $N_B \approx 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ برابر است با: $N_S = 4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ، بنابراین داریم: $N_B/N_S = 2.5 \times 10^{-3}$

فواصل نفوذ بیس

در بایاس معکوس ۱۰ ولت، داریم: $V/N_B \approx 10^{-15} \text{ V/cm}^{-3}$. در نتیجه عرض کل ناحیه تخلیه اتصال کلکتور-بیس توسط منحنی‌های لورنس-وارنر ۱/۴ میکرون بدست می‌آید و تقریباً ۰/۲۸ آن یعنی ۰/۴ میکرون درون بیس قرار می‌گیرد. بنابراین سهم لایه همبافته از ناحیه تخلیه $1 \mu\text{m}$ خواهد بود.

نفوذ جانبی بیس برابر است با: $2 = 2/5 \times 2/8$ میکرون

بنابراین حداقل فواصل بین پنجره‌ها در بدترین شرایط توسط عبارت‌های زیر داده می‌شوند:

D_{I-B} = نفوذ جانبی عایق + سهم لایه همبافته از ناحیه تخلیه اتصال عایق + نفوذ جانبی بیس + سهم لایه همبافته از ناحیه تخلیه اتصال بیس کلکتور + تلرانس تطبیق نقاب + حداقل فاصله در بدترین شرایط

- در عمل فاصله عایق تا بیس را باید بیشتر از مقدار محاسبه شده توسط رابطه بالا در نظر گرفت، زیرا سوراخها و حفره‌های موجود در نقاب عایق می‌تواند موجب ایجاد نواحی p شود و فاصله لازم را تغییر دهد. اضافه کردن یک فاصله که مقدار مناسب آن از تجربه حاصل می‌شود، معمولاً بازدهی (Yield) فرایند را بهبود می‌بخشد.

فواصل نفوذ بیس

D_{C-B} = نفوذ جانبی کلکتور عمیق (n^+) + سهم لایه همبافته از ناحیه تخلیه اتصال بیس-کلکتور +

نفوذ جانبی بیس + تلرانس تطبیق دو نقاب + حداقل فاصله در بدترین شرایط

بنابراین این دو فاصله برابرند با:

$$D_{I-B} = 5/5 + 1 + 2 + 1 + 4/5 + 1 = 15 \mu\text{m}$$

$$D_{C-B} = 5/3 + 1 + 2 + 5/5 + 1 = 14/3 \approx 15 \mu\text{m}$$

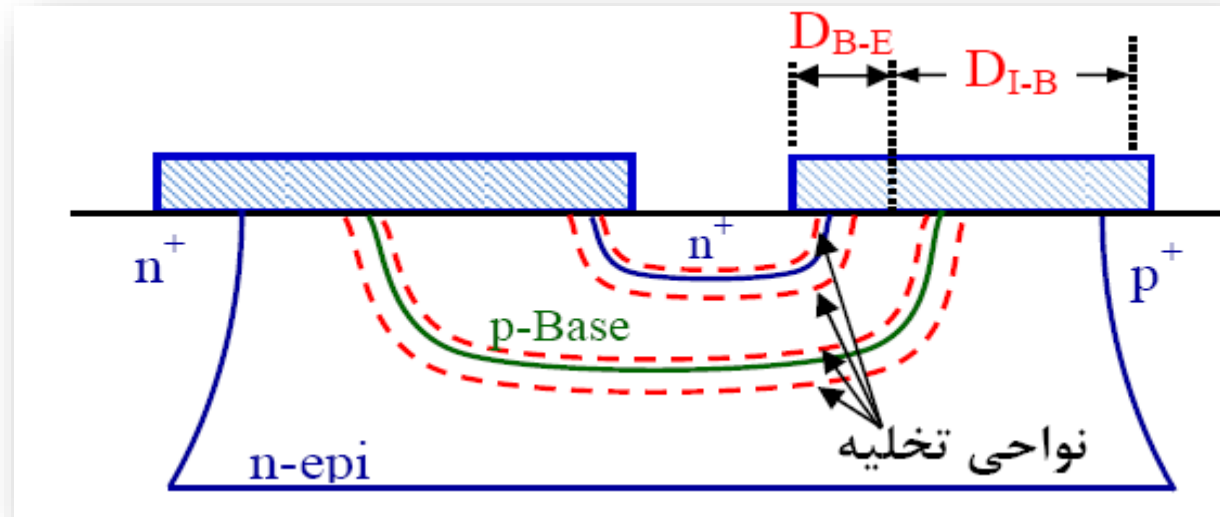
در ترانزیستورهایی که دارای دو ناحیه بیس در روی لایه مدفون مشترکی هستند، لازم است حداقل فاصله بین دو پنجره روی نقاب بیس در نظر گرفته شود. این امر بویژه در طراحی مقاومتهای نفوذی و ترانزیستورهای مشترک حائز اهمیت است. در این مورد داریم:

$D_{B-B} = 2 \times (\text{نفوذ جانبی بیس} + \text{سهم لایه همبافته از ناحیه تخلیه اتصال بیس-کلکتور} + \text{میزان عدم}$

دقت در لبه‌ها (Feature-edge uncertainty) + حداقل فاصله در بدترین شرایط

بدلیل قرار داشتن تمام نقش‌ها روی یک نقاب، نیازی به در نظر گرفتن تلرانس تطبیق نقاب نیست اما بایستی خطای ناشی از عدم دقت لبه‌ها را مد نظر داشت.

فاصله نفوذ امیتر از نفوذ بیس



شکل (۵): ارتباط میان فواصل مربوط به نقاب‌های نفوذ امیتر و بیس

نفوذ امیتر دارای پروفایل تابع مکمل خطا با عمق تقریبی $1/5$ میکرون بوده و درون نفوذ بیس قرار می‌گیرد. نفوذ امیتر در دمای 1050°C با استفاده از POCl_3 انجام می‌پذیرد. نقاب نفوذ امیتر نسبت به نقاب نفوذ بیس تطبیق می‌شود.

فاصله نفوذ امیتر از نفوذ بیس

با توجه به مطالب گذشته، حداقل فاصله بین پنجره نقاب امیتر و پنجره نقاب بیس به کمک شکل (۵) عبارتست از:

D_{E-B} = نفوذ جانبی امیتر + سهم بیس از ناحیه تخلیه اتصال امیتر-بیس + سهم بیس از ناحیه تخلیه اتصال کلکتور-بیس - نفوذ جانبی بیس + تلرانس تطبیق نقاب + حداقل فاصله در بدترین شرایط

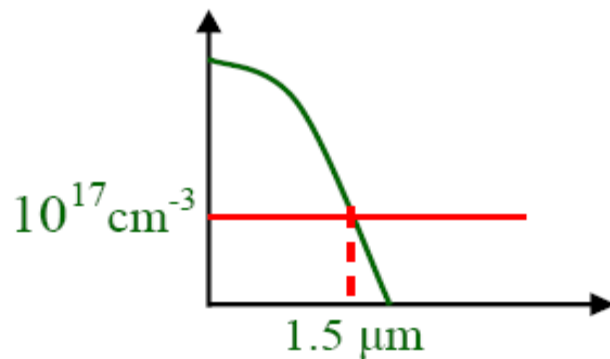
اگر تراکم ناخالصی‌ها در محل اتصال بیس-امیتر را تقریباً 10^{17}cm^{-3} گرفته، آن را به عنوان تراکم زمینه نفوذ امیتر فرض کنیم، در بایاس معکوس ۵ ولت داریم: $V/N_B \approx 5 \times 10^{-17} \text{V/cm}^{-3}$ ، با استفاده از منحنی‌های لورنس-وارنر، عرض کل ناحیه تخلیه اتصال بیس-امیتر در حدود $0.25 \mu\text{m}$ میکرون بدست می‌آید که حدود یک پنجم آن در امیتر خواهد بود.

نفوذ جانبی امیتر برابر است با: $0.8 \times 1/5 = 1/2$ میکرون

بنابراین D_{E-B} برابر است با:

$$D_{E-B} = 1/2 + 0.2 + 0.4 - 2 + 4/5 + 1 = 5/3 \approx 6 \mu\text{m}$$

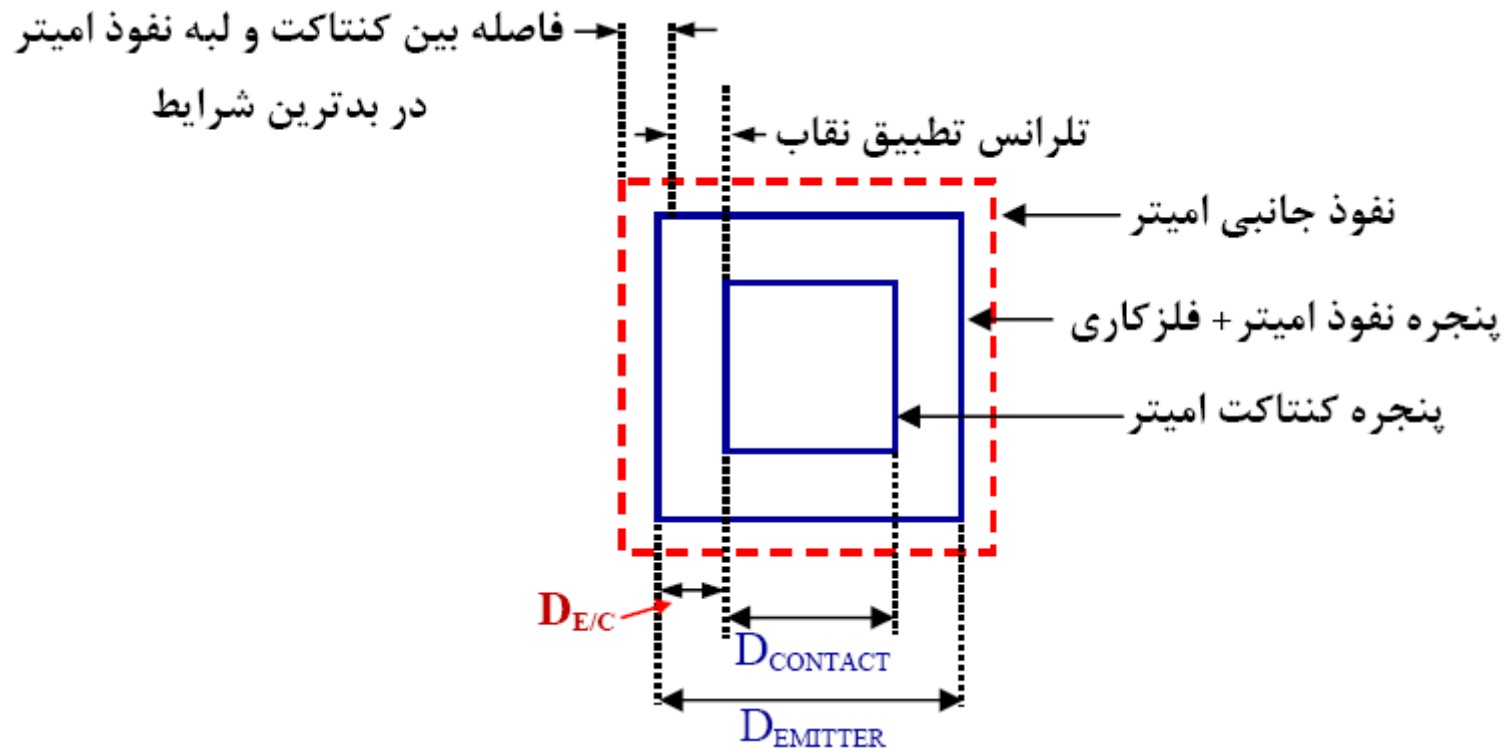
تمرین ۲: با فرض ثابت بودن تراکم زمینه (بیس) برابر با 10^{17} cm^{-3} و پروفایل تابع مکمل خطا برای نفوذ امیتر، زمان نفوذ را به گونه‌ای بدست آوربد که عمق نفوذ $1/5$ میکرون باشد.



$$N(x, t) = N_0 \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

کنتاکت امیتر:

ثبت مجدد (Reregistration) کنتاکت امیتر بدین معنی است که یک نقاب برای ایجاد پنجره نفوذ امیتر و نقاب دیگری جهت باز کردن پنجره کنتاکت بکار می‌رود که همیشه بایستی درون ناحیه امیتر قرار گیرد. از این نقاب کنتاکت به منظور باز کردن کنتاکت‌های نواحی بیس و کلکتور نیز استفاده می‌شود.



شکل (۶): قرار دادن پنجره کنتاکت امیتر

اگر حداقل فاصله بین پنجره کنتاکت امیتر و لبه نفوذ امیتر را در بدترین حالت ۱ میکرون بگیریم، با مراجعه به شکل (۶)، حداقل فاصله امیتر از کنتاکت $D_{E/C}$ با رابطه زیر داده می‌شود (در اینجا فرض بر این است که نقاب کنتاکت نسبت به لبه پنجره اکسید نفوذ امیتر تطبیق می‌شود):

کنتاکت امیتر

$D_{E/C}$ = حداقل فاصله بین کنتاکت امیتر و لبه نفوذ امیتر در بدترین شرایط + تolerانس تطبیق نقاب -
نفوذ جانبی امیتر

بنابراین داریم:

$$D_{E/C} = 1 + 4/5 - 1/2 = 4/3 \approx 5 \mu\text{m}$$

قرار دادن کنتاکت بیس:

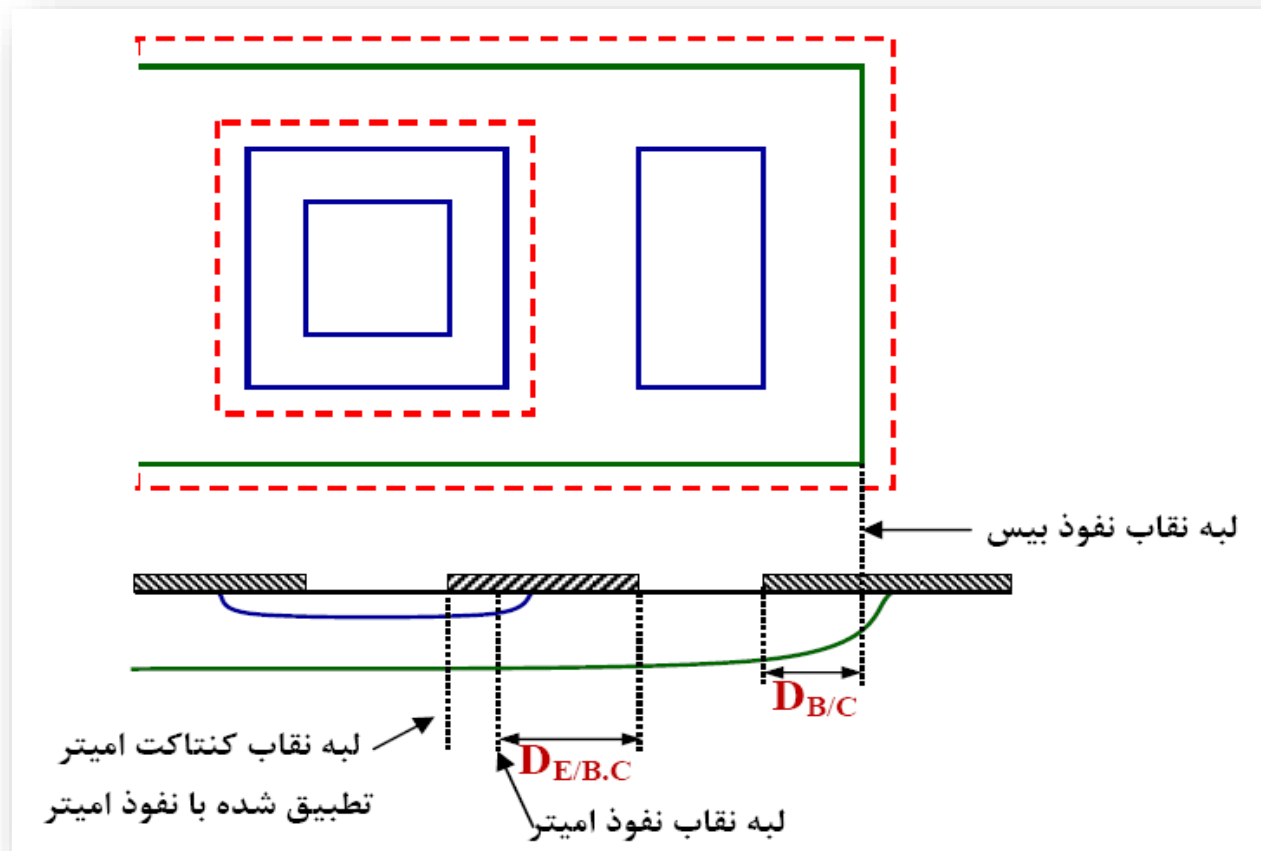
در شکل (۷) نمای بالای ناحیه بیس ترانزیستور رسم شده است که ارتباط میان کنتاکت بیس، نفوذ بیس و لبه نفوذ امیتر را نشان می‌دهد.

حال می‌خواهیم حداقل فاصله بین کنتاکت بیس در نقاب کنتاکت و لبه نقاب نفوذ بیس ($D_{B/C}$) را بدست آوریم. تمام پنجره‌های کنتاکت روی یک نقاب قرار دارند که نقاب فوق نسبت به نقاب نفوذ امیتر تطبیق می‌شود.

باز هم بدلیل اینکه نفوذ بیس و کنتاکت بیس (که همراه کنتاکت‌های امیتر و کلکتور انجام می‌شود) در دو مرحله جداگانه صورت می‌پذیرد، تolerانس تطبیق دو نقاب را باید در نظر بگیریم. بنابراین:

کنتاکت بیس

$D_{B/C}$ = حداقل فاصله بین کنتاکت بیس و لبه نفوذ بیس در بدترین شرایط + سهم بیس از ناحیه تخلیه
اتصال کلکتور-بیس + تفرانس تطبیق دو نقاب- نفوذ جانبی بیس



شکل (۷): ارتباط بین کنتاکت بیس و نفوذهای بیس و امیتر

به همین ترتیب حداقل فاصله بین کنتاکت بیس در نقاب کنتاکت و لبه نقاب نفوذ امیتر ($D_{E/B.C}$) را می توان بصورت زیر نوشت:

$D_{E/B.C}$ = نفوذ جانبی امیتر + سهم بیس از ناحیه تخلیه اتصال امیتر-بیس + تفرانس تطبیق نقاب + حداقل فاصله در بدترین شرایط

$$D_{B/C} = 1 + 0/4 + 5/5 - 2 = 4/9 \approx 5 \mu\text{m}$$

$$D_{E/B.C} = 1/2 + 0/2 + 4/5 + 1 = 6/9 \approx 7 \mu\text{m}$$

کنتاکت در ناحیه کلکتور:

قبل از نفوذ امیتر، پنجره‌ای در ناحیه کلکتور باز می‌کنیم تا تراکم سطحی ناخالصی‌ها زیاد شود. حداقل فاصله بین پنجره کنتاکت کلکتور روی نقاب نفوذ امیتر و نقاب نفوذ بیس کمتر از فاصله کلکتور عمیق تا نفوذ بیس است زیرا نفوذ امیتر کم عمق است. بنابراین نقش‌های نقاب نفوذ کلکتور عمیق را می‌توان در نقاب نفوذ امیتر مجدداً باز نمود بدون این که مشکلی ایجاد شود.

دستور العمل جانمایی

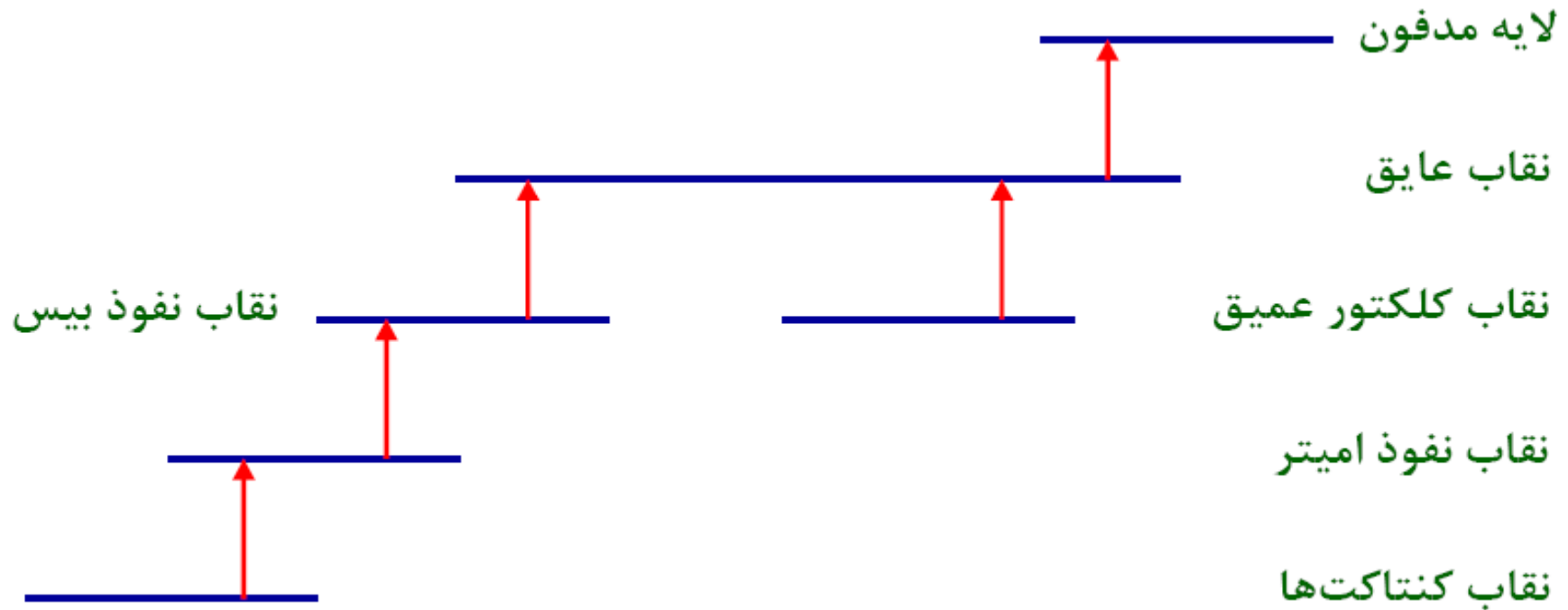
بالاخره توجه کنید بدلیل نفوذ جانبی زیاد کلکتور عمیق و نفوذ جانبی کم نفوذ امیتر، پنجره کنتاکت کلکتور در نقاب نفوذ امیتر را می توان ۱ یا ۲ میکرون بزرگتر از پنجره نفوذ کلکتور عمیق در نظر گرفت.

نتایج حاصل از این بخش را می توان در جدول زیر خلاصه کرد:

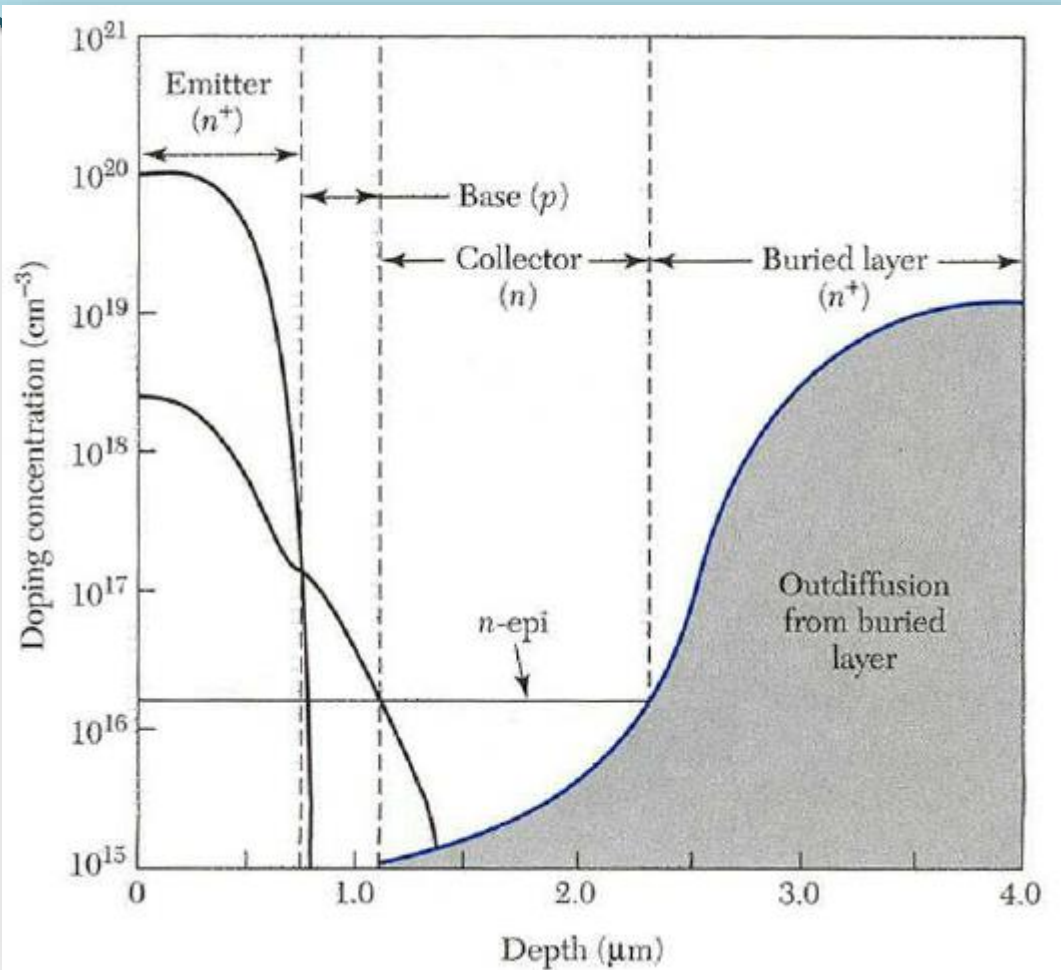
جدول (۳): حداقل فواصل طراحی

میکرومتر	حداقل فاصله	میکرومتر	حداقل فاصله
۱۸	کلکتور عمیق-عایق	۱۷	لایه مدفون-عایق
۱۵	کلکتور عمیق-نفوذ بیس	۱۵	نفوذ بیس-عایق
۵	نفوذ امیتر-کنتاکت امیتر	۶	نفوذ امیتر-نفوذ بیس
۵	نفوذ بیس-کنتاکت بیس	۷	نفوذ امیتر-کنتاکت بیس
۸	حداقل فاصله نوارهای فلزی کوتاه	۱۰	حداقل عرض نوار فلزی
۷	امیتر-امیتر	۸×۸	ابعاد کوچکترین پنجره
		۱۰	بیس-بیس

دستور العمل جانمایی



شکل (۸): نحوه تطبیق نقاب‌ها نسبت به هم



پروفایل‌های ناخالصی ترانزیستور npn