





| | | |
|--|---|--|
| کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی |  عنوان درس: |    |
| استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی | ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک | معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT |

درس ۲ = الکترواستاتیک پیوند PN و MOS (IV)

الکترواستاتیک ساختمان نیمه هادی - اکسید - فلز




۲۹ سپتامبر ۲۰۰۵

محتویات

- ۱- مقدمه‌ای بر ساختار MOS
- ۲- الکترواستاتیک MOS در بایاس صفر
- ۳- الکترواستاتیک MOS تحت بایاس



تکلیف خواندنی

Howe و Sodini، فصل ۳، بخش‌های ۳/۸ - ۳/۷

| | | |
|--|--|---|
| کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی |  عنوان درس: |  دوره های آزاد رایانه ای SBU-MIT OCW Joint Project  |
| استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی | ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک | معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT |

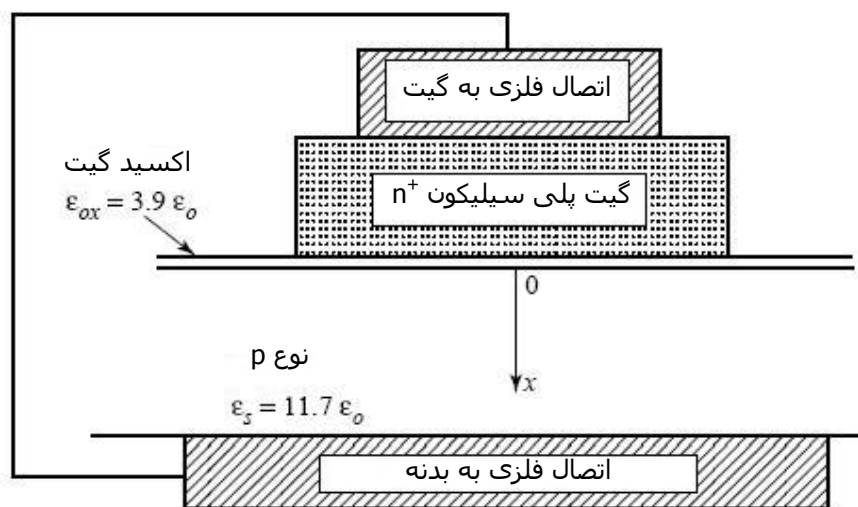
سوالات کلیدی

- نکته مهم درباره ساختمان نیمه هادی - اکسید - فلز چیست؟
- الکترواستاتیک ساختمان MOS در بایاس صفر چگونه به نظر می رسد؟
- الکترواستاتیک ساختمان MOS چگونه اصلاح می شود اگر ولتاژی به دوسر ترمینال های آن اعمال شود؟

| | | |
|--|--|--|
| کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی |  عنوان درس: ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک |  |
| استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی | | معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT |


۱- مقدمه

ساختمان نیمه هادی - اکسید - فلز



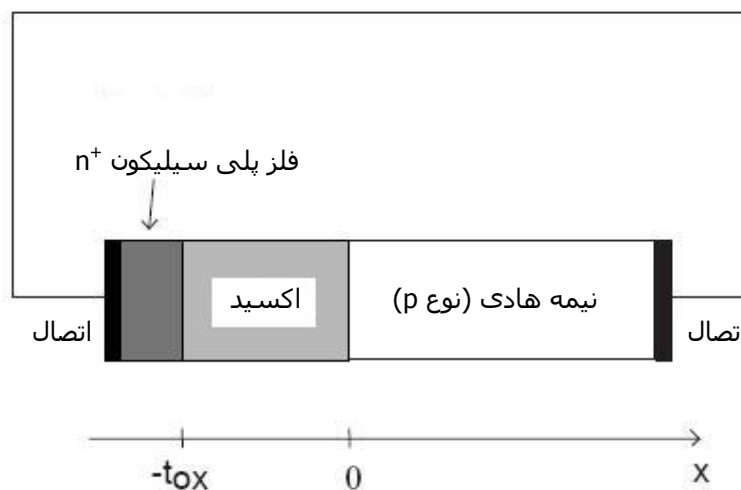
MOS در قلب تحول الکترونیک:

- عملکرد دیجیتال و آنالوگ: ترانزیستور اثر میدان نیمه هادی اکسید فلزی (MOSFET) عنصر کلیدی خانواده مدارهای مکمل نیمه هادی - اکسید - فلزی (CMOS) است.
- عملکرد حافظه: حافظه دینامیک با دسترسی تصادفی (DRAM) و حافظه لحظه‌ای پاک شدنی قابل برنامه‌ریزی (EPROM)
- مصور ساختن: دوربین با ابزار شارژ - کوپلی (CCD)
- صفحه نمایش‌ها: صفحه نمایش‌های ماتریسی فعال کریستال مایع
- ...

| | | |
|--|--|--|
| کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی | بهشتی عنوان درس: |  |
| استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی | ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک | معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT |

۲- الکترواستاتیک MOS در بایاس صفر



ساختمان یک بعدی ایده‌آل:



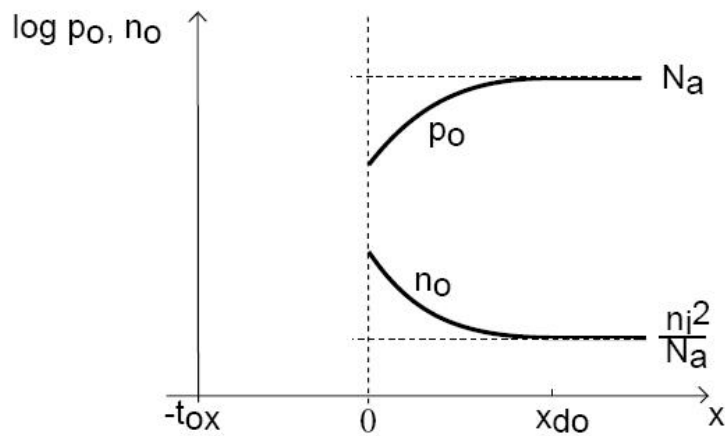
- فلز: شارژ را در حجم تحمل نمی‌کند \Leftarrow شارژ تنها می‌تواند روی سطح وجود داشته باشد
- اکسید: عایق \Leftarrow شارژ وجود ندارد (حامل آزاد وجود ندارد، ناخالصی وجود ندارد)
- نیمه هادی: می‌تواند شارژ در حجم داشته باشد (SCR)

تعادل حرارتی نمی‌تواند از طریق اکسید برقرار شود؛ برای امکان انتقال شارژ بین فلز و نیمه هادی به سیم نیاز دارد

ساختمان MOS: ساندویچی از مواد غیر مشابه \Leftarrow انتقال حامل \Leftarrow ناحیه شارژ فضایی در بایاس صفر \Leftarrow پتانسیل درون ساز


| | | |
|--|--|--|
| کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی |  عنوان درس: ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک |  دوره های آزاد رایانه ای SBU-MIT OCW Joint Project |
| استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی | | معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT |

برای بیشتر فلزات روی سیلیکون از نوع p، تعادل با نفوذ الکترون‌ها از فلز به نیمه هادی و حفره‌ها از نیمه هادی به فلز حاصل می‌شود

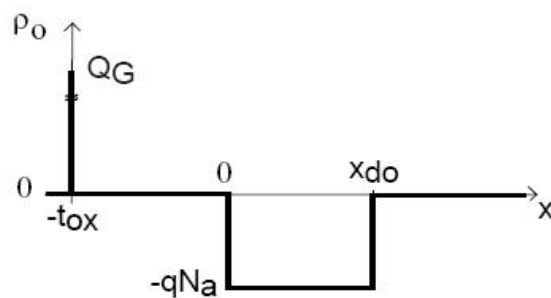
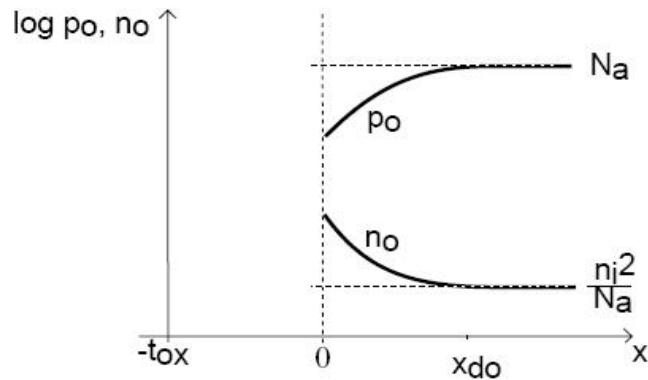


به خاطر داشته باشید: $n_0 p_0 = n_i^2$

در نزدیکی حد واسط Si/SiO_2 حفره‌های کمتری است \Leftarrow پذیرنده‌های یونیزه شده در معرض تماس قرار گرفته‌اند (حجم شارژ فضایی)

| | | |
|--|--|---|
| کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی | بهشتی عنوان درس: ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک |  دوره های آزاد رایانه ای SBU-MIT OCW Joint Project |
| استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی | | معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT |

□ چگالی شارژ فضایی



● در نیمه هادی: ناحیه شارژ فضایی نزدیک به خط واسط Si/SiO_2 می تواند تخمین تخلیه انجام شود

● در فلز: ورقه شارژ در حد واسط فلز/ SiO_2



● خنثی بودن شارژ کلی

$$x \leq -t_{ox} \quad \rho_o(x) = Q_G \delta(-t_{ox})$$

$$-t_{ox} < x < 0 \quad \rho_o(x) = 0$$

$$0 < x < x_{do} \quad \rho_o(x) = -qN_a$$

$$x_{do} < x \quad \rho_o(x) = 0$$

| | | |
|--|--|--|
| کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی |  عنوان درس: ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک |  |
| استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی | | معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT |

□ میدان الکتریکی

از معادله Gauss انتگرال بگیرید:

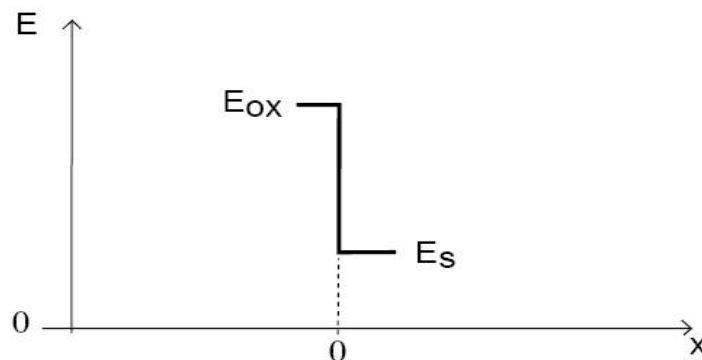
$$E_o(x_2) - E_o(x_1) = \frac{1}{\epsilon} \int_{x_1}^{x_2} \rho_o(x) dx$$


در حد واسط بین اکسید و نیمه هادی:

تغییر در قابلیت عبور (Permittivity) \Leftarrow تغییر در میدان الکتریکی

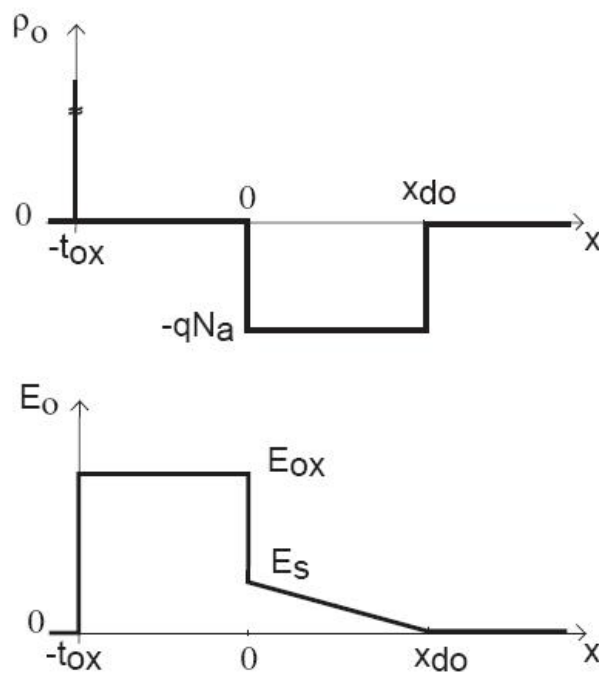
$$\epsilon_{ox} E_{ox} = \epsilon_s E_s$$

$$\frac{E_{ox}}{E_s} = \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{ox}} \approx 3$$



| | | |
|--|--|--|
| کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی | بهشتی عنوان درس: ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک |  |
| استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی | | معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT |

انتگرال گیری را از عمق داخل نیمه هادی شروع کنید:





$$x_{do} < x \quad E_o(x) = 0$$

$$0 < x < x_{do} \quad E_o(x) = -\frac{qN_a}{\epsilon_s}(x - x_{do})$$

$$-t_{ox} < x < 0 \quad E_o(x) = \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{ox}} E_o(x = 0^+) = \frac{qN_a x_{do}}{\epsilon_{ox}}$$

$$x < -x_{ox} \quad E_o(x) = 0$$

| | | |
|--|--|--|
| کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی |  عنوان درس: ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک |  دوره های آزاد رایانه ای SBU-MIT OCW Joint Project |
| استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی | | معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT |

□ پتانسیل الکترواستاتیک

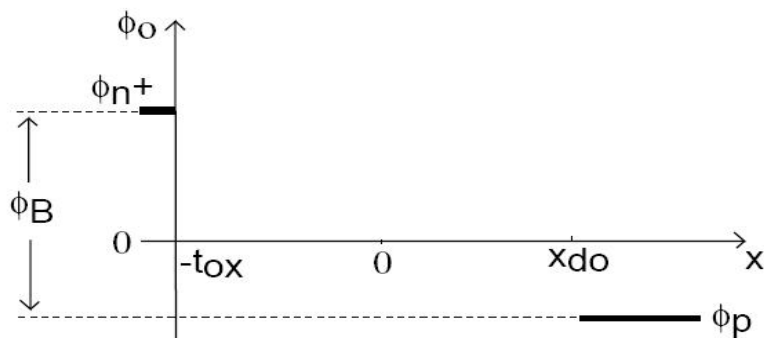
(با $\phi = 0$ در $n_o = p_o = n_i$)

$$\phi = \frac{kT}{q} \ln \frac{n_o}{n_i} \qquad \phi = -\frac{kT}{q} \ln \frac{p_o}{n_i}$$

در QNR n_o و p_o معلومند $\Leftarrow \phi$ را می توان تعیین کرد:



در دروازه (گیت) $n^+ : n_o = N_d^+ : \phi_g = \phi_{n^+} \Leftarrow$

در نوع P $p_o = N_a : \phi_p = -\frac{kT}{q} \ln \frac{N_a}{n_i} \Leftarrow$



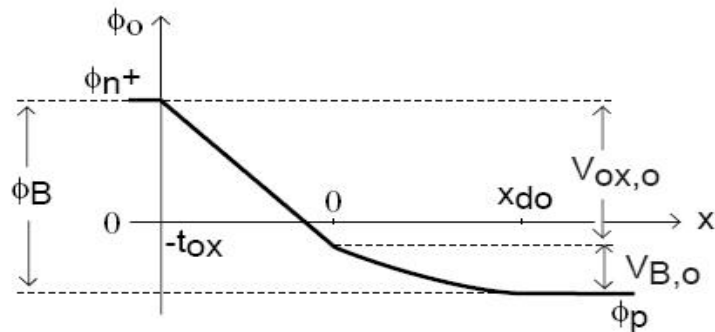
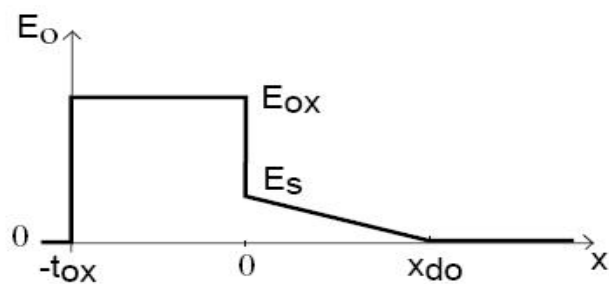
پتانسیل درون ساز:

$$\phi_B = \phi_g - \phi_p = \phi_{n^+} + \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a}{n_i}$$

| | | |
|--|--|--|
| کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی |  عنوان درس: ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک |  دوره های آزاد رایانه ای SBU-MIT OCW Joint Project |
| استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی | | معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT |

برای به دست آوردن $\phi_o(x)$ ، $E_o(x)$ را انتگرال بگیرید؛ از عمق داخل بدنه نیمه هادی شروع کنید:

$$\phi_o(x_2) - \phi_o(x_1) = -\int_{x_1}^{x_2} E_o(x) dx$$





$$x_{do} < x \quad \phi_o(x) = \phi_p$$

$$0 < x < x_d \quad \phi_o(x) = \phi_p + \frac{qN_a}{2\epsilon_s}(x - x_{do})^2$$

$$-t_{ox} < x < 0 \quad \phi_o(x) = \phi_p + \frac{qN_a x_{do}^2}{2\epsilon_s} + \frac{qN_a x_{do}}{\epsilon_{ox}}(-x)$$

$$x < -t_{ox} \quad \phi_o(x) = \phi_{n+}$$

| | | |
|--|--|--|
| کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی |  عنوان درس: ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک |  |
| استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی | | معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT |

□ هنوز x_{do} نامعلوم است \Leftarrow یک معادله دیگر نیاز است:

اختلاف پتانسیل در دوسر ساختمان باید اضافه شود تا ϕ_B به دست آید:

$$\phi_B = V_{B,o} + V_{ox,o} = \frac{qN_a x_{do}^2}{2\epsilon_s} + \frac{qN_a x_{do} t_{ox}}{\epsilon_{ox}}$$

معادله درجه دوم را حل کنید:




$$x_{do} = \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{ox}} t_{ox} \left[\sqrt{1 + \frac{2\epsilon_{ox}^2 \phi_B}{\epsilon_s q N_a t_{ox}^2}} - 1 \right] = \frac{\epsilon_s}{C_{ox}} \left[\sqrt{1 + \frac{4\phi_B}{\gamma^2}} - 1 \right]$$

در حالی که C_{ox} ظرفیت در واحد سطح اکسید است [واحدها: F/cm^2]

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}}$$

و γ ضریب فاکتور بدنه است [واحدها: $V^{-1/2}$]

$$\gamma = \frac{1}{C_{ox}} \sqrt{2\epsilon_s q N_a}$$

| | | |
|--|--|---|
| کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی |  عنوان درس: |  دوره های آزاد رایانه ای SBU-MIT OCW Joint Project  |
| استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی | ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک | معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT |

□ مثال عددی:


$$N_d = 10^{20} \text{ cm}^{-3}, N_a = 10^{17} \text{ cm}^{-3}, t_{ox} = 8 \text{ nm}$$

$$\phi_B = 550 \text{ mV} + 420 \text{ mV} = 970 \text{ mV}$$

$$C_{ox} = 4.3 \times 10^{-7} \text{ F/cm}^2$$

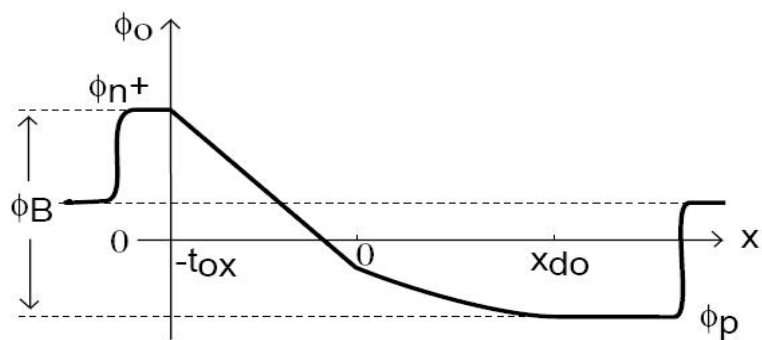
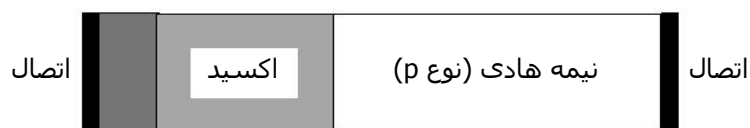
$$\gamma = 0.43 \text{ V}^{1/2}$$



$$x_{do} = 91 \text{ nm}$$

| | | |
|--|--|---|
| کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی | بهشتی عنوان درس: ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک |  دوره های آزاد رایانه ای SBU-MIT OCW Joint Project |
| استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی | | معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT |

همچنین پتانسیل‌های اتصال وجود دارند \Leftarrow کل اختلاف پتانسیل اتصال به اتصال صفر است!

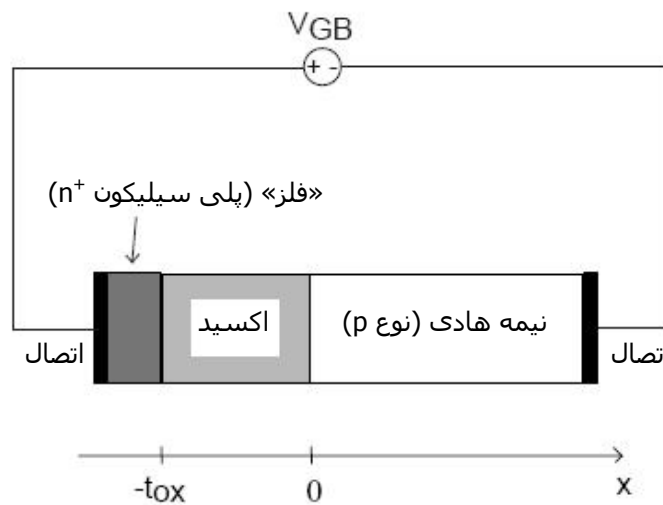
«فلز»



| | | |
|---|--|--|
| کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی |  عنوان درس: ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک |  دوره های آزاد رایانه ای SBU-MIT OCW Joint Project |
| استاد مدرس MIT: پروفسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی | | معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT |

۳- الکترواستاتیک MOS تحت بایاس

با ملاحظه نیمه هادی ولتاژ را به دروازه (گیت) اعمال کنید:




الکترواستاتیک ساختمان MOS تأثیر می پذیرند \Leftarrow اختلاف پتانسیل در دوسر کل ساختمان اکنون $0 \neq$

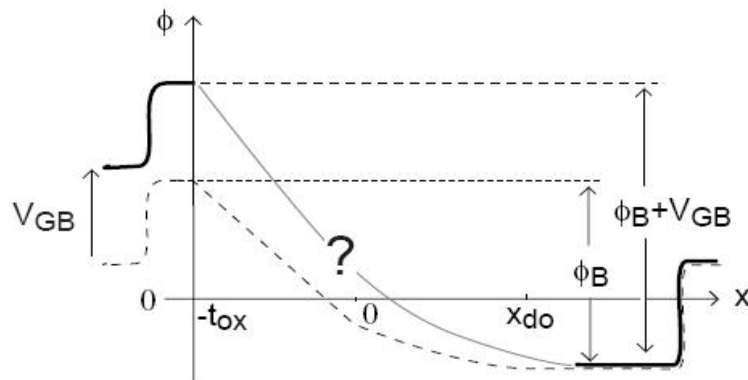
به اختلاف پتانسیل چگونه کمک شده است؟

پتانسیل می تواند افت کند در:

- اتصال (دروازه) گیت
- دروازه پلی سیلیکون n^+
- اکسید
- SCR نیمه هادی
- QNR نیمه هادی
- اتصال نیمه هادی

| | | |
|--|--|--|
| کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی | بهشتی عنوان درس: ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک |  |
| استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی | | معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT |

اختلاف پتانسیل دوسر اکسید و SCR در نیمه هادی خودنمایی می‌کند:





اکسید عایق است \Leftarrow هیچ جریانی در هیچ جای ساختمان وجود ندارد

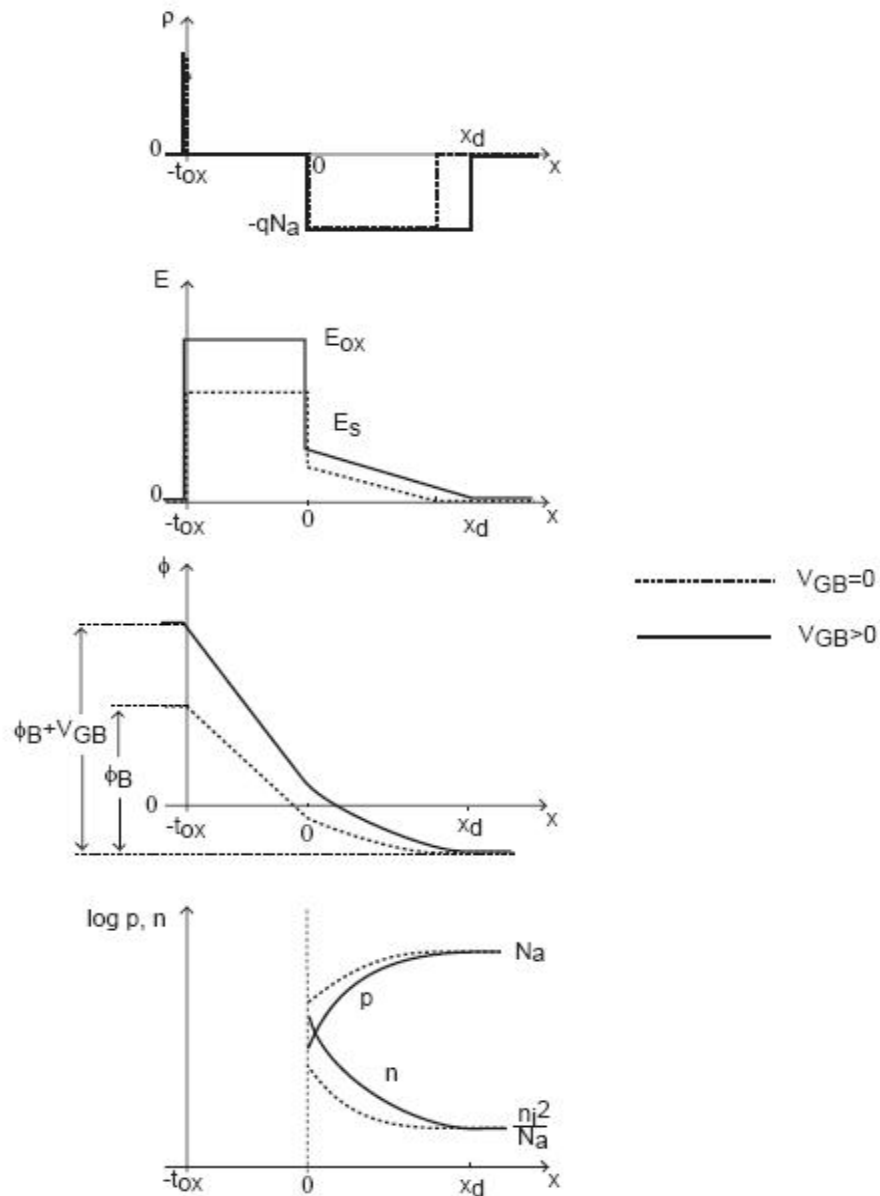
در SCR موقعیت شبه تعادلی غالب می‌شود \Leftarrow تعادل جدید بین رانش و نفوذ

● الکترواستاتیک به طور کیفی مثل بایاس صفر (اما مقدار توزیع دوباره شارژ متفاوت است)

● $np = n_i^2$



| | | |
|--|--|--|
| کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی |  عنوان درس: ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک |  |
| استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی | | معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT |

$V_{GB} > 0$ اعمال کنید: اختلاف پتانسیل در سراسر ساختمان افزایش می‌یابد \Leftarrow دو قطبی شارژ بزرگ‌تر نیاز دارد \Leftarrow SCR به زمینه نیمه هادی بسط می‌یابد:



روش آسان برای به خاطر سپردن:

با $V_{GB} > 0$ ، دروازه (گیت) الکترون‌ها را جذب می‌کند و حفره‌ها را دفع می‌کند.

| | | |
|--|--|--|
| کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی |  عنوان درس: ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک |  |
| استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی | | معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT |



به طور کیفی، با اعمال $V_{GB} > 0$ فیزیک قطعه تغییر نیافته است.
 فرمول ریاضی مربوط به بایاس صفر را استفاده کنید، اما:

$$\phi_B \rightarrow \phi_B + V_{GB}$$

برای مثال:

$$x_d(V_{GB}) = \frac{\epsilon_s}{C_{ox}} \left[\sqrt{1 + \frac{4(\phi_B + V_{GB})}{\gamma^2}} - 1 \right]$$

$$V_{GB} \uparrow \rightarrow x_d \uparrow$$

| | | |
|--|--|--|
| کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی |  عنوان درس: |  دوره های آزاد رایانه ای SBU-MIT OCW Joint Project |
| استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی | ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک | معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT |

نتایج کلیدی

- توزیع دوباره شارژ در ساختمان MOS در بایاس صفر:
 - SCR در نیمه هادی
 - پتانسیل درون ساز در دو سر ساختمان MOS
- در بیشتر موارد، می توان تخمین تخلیه را در SCR نیمه هادی انجام داد
- اعمال ولتاژ عرض ناحیه تخلیه را در نیمه هادی تنظیم می کند. هیچ جریانی جریان نمی یابد.