



# **Uvod, poluprovodnički elementi i komponente, fizika poluprovodnika**

**Marko Dimitrijević**

# Uvod

- Elektronika je imala izuzetan uticaj na razvoj ljudske civilizacije i zauzima značajno mesto u našem svakodnevnom životu.
- Elektronski uređaji su prisutni svuda – u telekomunikacijama, saobraćaju, medicini, energetici,...
- U okviru predmeta **Uvod u elektroniku** predstavljeni su osnovni pojmovi električnih signala, poluprovodničkih elemenata i kola, i predstavljene metode analize kola pomoću simulatora.
- Cilj predmeta **Osnovi elektronike** je da se shvate osnovni koncepti i metodi elektronike – analiza i projektovanje osnovnih analognih elektronskih kola.

# Poluprovodničke komponente

- Osnovne električne komponente (otpornici, kondenzatori i kalemovi) su **dvopoli** (imaju dva priključka) i najčešće su **linearne** – električne veličine imaju linearnu zavisnost.
- Mogućnosti primene ovih komponenti su ograničene.
- Elektronska kola osim osnovnih električnih komponenti sadrže i poluprovodničke komponente – **diode** i **tranzistore**.
- Pomoću poluprovodničkih komponenti moguće je realizovati veliki broj korisnih elektronskih kola, uređaja i sistema. U okviru predmeta Osnovi elektronike biće reči o nekim od ovih kola.

# Poluprovodnički materijali – poluprovodnici

- Poluprovodničke komponente su izrađene od materijala koji se nazivaju **poluprovodnički materijali** ili jednostavnije, **poluprovodnici**.
- Najčešće korišćeni poluprovodnici su elementi silicijum (**Si**) i germanijum (**Ge**), kao i jedinjenja III i V grupe periodnog sistema, tzv. **III-V elementi** (galijum-arsenid **GaAs**, galijum-nitrid **GaN**, itd.).
- Poluprovodnički elementi (**Si**, **Ge**) pripadaju **IV** grupi periodnog sistema i imaju **četiri valentna elektrona**. Valentni elektroni su elektroni poslednje **atomske orbitale**, koji mogu da učestvuju u stvaranju hemijskih veza sa drugim atomima i određuju hemijska svojstva elementa.

# Poluprovodnički materijali – poluprovodnici

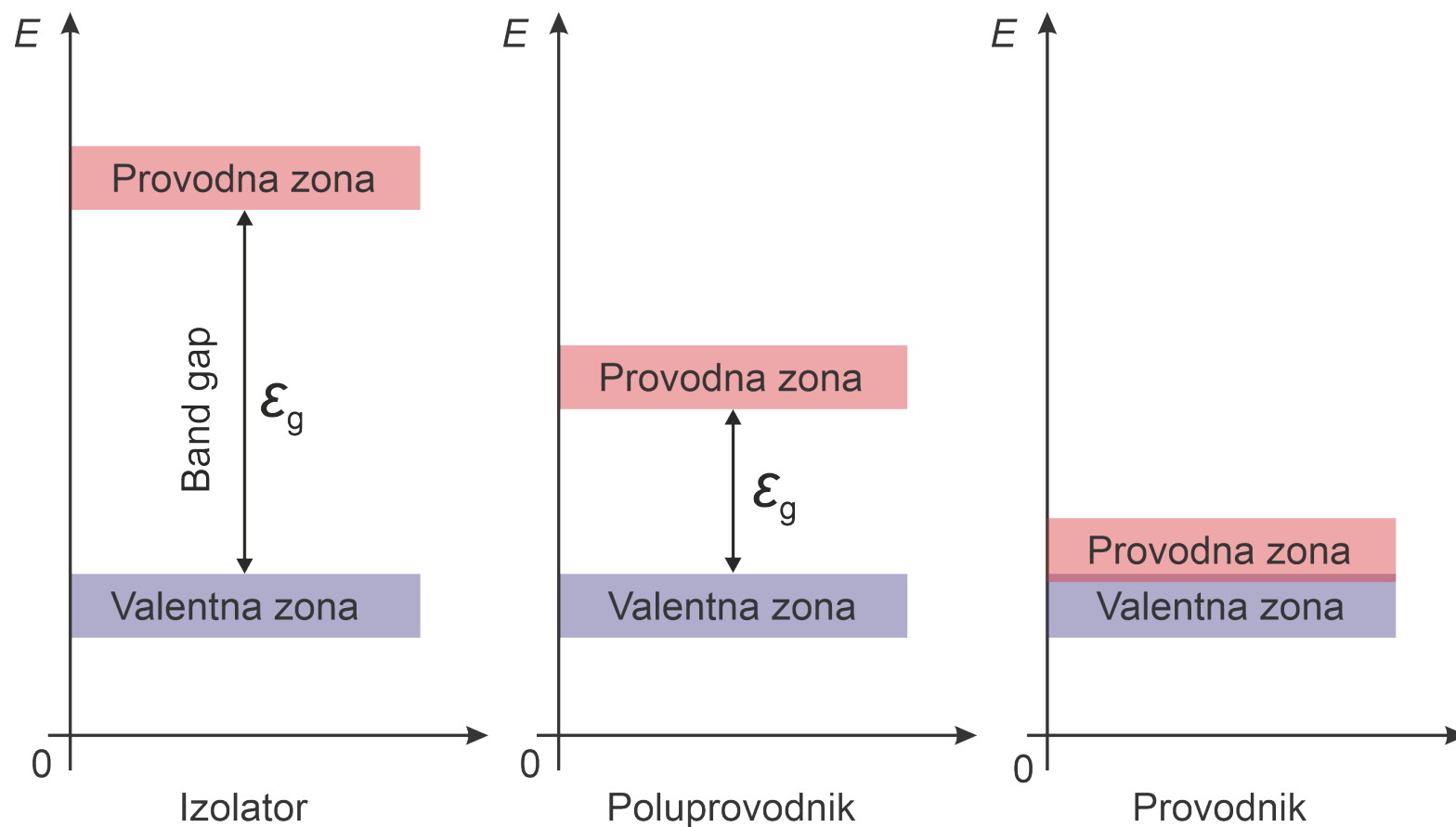
Legend:

- Nonmetal (Light Green)
- Alkali Metal (Dark Green)
- Alkaline Earth Metal (Blue)
- Transition Metal (Purple)
- Lanthanide (Pink)
- Actinide (Light Purple)
- Metalloid (Teal)
- Post-Transition Metal (Yellow)
- Halogen (Orange)
- Noble Gas (Red)
- Solid (\*)
- Liquid (\*\*)
- Gas (\*\*\*)

H 1.008 1																	He 4.003 2																														
Li 6.941 3	Be 9.012 4											B 10.81 5	C 12.01 6	N 14.01 7	O 16.00 8	F 18.998 9	Ne 20.18 10																														
Na 22.99 11	Mg 24.31 12											Al 26.98 13	Si 28.09 14	P 30.97 15	S 32.07 16	Cl 35.45 17	Ar 39.95 18																														
K 39.10 19	Ca 40.08 20	Sc 44.96 21	Ti 47.87 22	V 50.94 23	Cr 52.00 24	Mn 54.94 25	Fe 55.84 26	Co 58.93 27	Ni 58.69 28	Cu 63.55 29	Zn 65.39 30	Ga 69.72 31	Ge 72.63 32	As 74.92 33	Se 78.96 34	Br 79.90 35	Kr 83.80 36																														
Rb 85.47 37	Sr 87.62 38	Y 88.91 39	Zr 91.22 40	Nb 92.91 41	Mo 95.94 42	[98] 43	Tc 101.07 44	Ru 101.07 44	Rh 102.91 45	Pd 106.42 46	Ag 107.87 47	Cd 112.41 48	In 114.82 49	Sn 118.71 50	Sb 121.76 51	Te 127.60 52	I 126.90 53	Xe 131.29 54																													
Cs 132.91 55	Ba 137.33 56	LANTHANIDES ▼	Hf 178.49 72	Ta 180.95 73	W 183.84 74	Re 186.21 75	Os 190.23 76	Ir 192.22 77	Pt 195.08 78	Au 196.97 79	Hg 200.59 80	Tl 204.38 81	Pb 207.2 82	Bi 208.98 83	Po [209] 84	At [210] 85	Rn [222] 86																														
Fr [223] 87	Ra [226] 88	ACTINIDES ▼	Rf [267] 104	Db [268] 105	Sg [269] 106	Bh [270] 107	Hs [268] 108	Mt [278] 109	Ds [281] 110	Rg [281] 111	Cn [285] 112	Nh [286] 113	Fl [286] 114	Mc [289] 115	Lv [293] 116	Ts [294] 117	Og [294] 118																														
<table border="1"> <tr> <td>La 138.91 57</td> <td>Ce 140.12 58</td> <td>Pr 140.91 59</td> <td>Nd 144.24 60</td> <td>Pm [145] 61</td> <td>Sm 150.36 62</td> <td>Eu 151.96 63</td> <td>Gd 157.25 64</td> <td>Tb 158.93 65</td> <td>Dy 162.50 66</td> <td>Ho 164.93 67</td> <td>Er 167.26 68</td> <td>Tm 168.93 69</td> <td>Yb 173.04 70</td> <td>Lu 174.97 71</td> </tr> <tr> <td>Ac [227] 89</td> <td>Th 232.04 90</td> <td>Pa 231.04 91</td> <td>U 238.03 92</td> <td>Np [237] 93</td> <td>Pu [244] 94</td> <td>Am [243] 95</td> <td>Cm [247] 96</td> <td>Bk [247] 97</td> <td>Cf [251] 98</td> <td>Es [252] 99</td> <td>Fm [257] 100</td> <td>Md [268] 101</td> <td>No [260] 102</td> <td>Lr [262] 103</td> </tr> </table>																		La 138.91 57	Ce 140.12 58	Pr 140.91 59	Nd 144.24 60	Pm [145] 61	Sm 150.36 62	Eu 151.96 63	Gd 157.25 64	Tb 158.93 65	Dy 162.50 66	Ho 164.93 67	Er 167.26 68	Tm 168.93 69	Yb 173.04 70	Lu 174.97 71	Ac [227] 89	Th 232.04 90	Pa 231.04 91	U 238.03 92	Np [237] 93	Pu [244] 94	Am [243] 95	Cm [247] 96	Bk [247] 97	Cf [251] 98	Es [252] 99	Fm [257] 100	Md [268] 101	No [260] 102	Lr [262] 103
La 138.91 57	Ce 140.12 58	Pr 140.91 59	Nd 144.24 60	Pm [145] 61	Sm 150.36 62	Eu 151.96 63	Gd 157.25 64	Tb 158.93 65	Dy 162.50 66	Ho 164.93 67	Er 167.26 68	Tm 168.93 69	Yb 173.04 70	Lu 174.97 71																																	
Ac [227] 89	Th 232.04 90	Pa 231.04 91	U 238.03 92	Np [237] 93	Pu [244] 94	Am [243] 95	Cm [247] 96	Bk [247] 97	Cf [251] 98	Es [252] 99	Fm [257] 100	Md [268] 101	No [260] 102	Lr [262] 103																																	

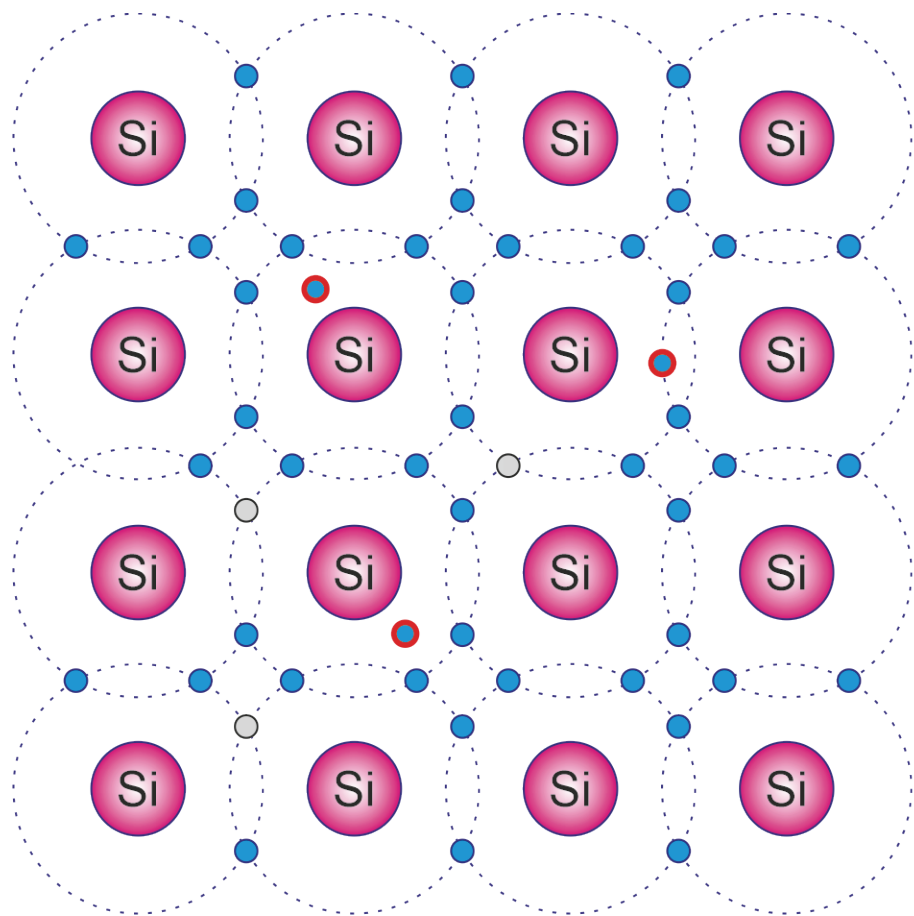


# Poluprovodnici



- **Izolatori** imaju veliki **energetski procep (band gap,  $\epsilon_g$ )** između valentne i provodne zone te je broj slobodnih elektrona vrlo mali.
- Kod **provodnika** provodna i valentna zona se preklapaju, tako da se valentni elektroni slobodno kreću kroz kristalnu rešetku.
- **Poluprovodnici** imaju manji energetski procep od izolatora, usled termičke eksitacije elektroni mogu postati slobodni.

# Poluprovodnici



- Si atom silicijuma
- valentni elektron
- provodni elektron
- šupljina

- Usled termičke ekscitacije, valentni elektroni se mogu preći iz valentne u provodnu zonu i povećati električnu provodnost materijala.
- Prelaskom elektrona u provodnu zonu, u valentnoj zoni ostaje **šupljina** koja se ponaša kao pozitivno naelektrisana čestica.

# Kretanje naelektrisanja u poluprovodniku

- Susedni elektroni u valentnoj zoni mogu popuniti šupljinu nastalu eksitacijom, pri čemu na njihovom mestu nastaje šupljina
- **Kretanje šupljina** u poluprovodniku zapravo predstavlja **kretanje elektrona u valentnoj zoni**.
- Prelaz elektrona iz valentne u provodnu zonu se naziva **eksitacija**, a suprotan proces – prelaz iz provodne u valentnu zonu **rekombinacija**.
- U procesu eksitacije nastaje par elektron-šupljina, u procesu rekombinacije nestaju slobodni nosioci naelektrisanja.



# Kretanje nosilaca naelektrisanja

- Koncentracija slobodnih elektrona u poluprovodniku  $n_i$  zavisi od temperature  $T$  i može se izraziti empirijskom formulom:

$$n_i = 5.2 \cdot 10^{15} \cdot T^{3/2} \cdot e^{-\frac{\varepsilon_g}{2kT}} \approx 10^{10} \text{ cm}^{-1} \quad (\text{Si}, T = 300\text{K}).$$

- Veličina  $\varepsilon_g$  se naziva **band gap** i zavisi od poluprovodnika ( $\varepsilon_g = 1,2\text{eV}$  za silicijum).
- $k$  je Bolcmanova konstanta,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ .
- Čist poluprovodnik ima jednaku koncentraciju elektrona i šupljina:

$$n_i = n = p.$$

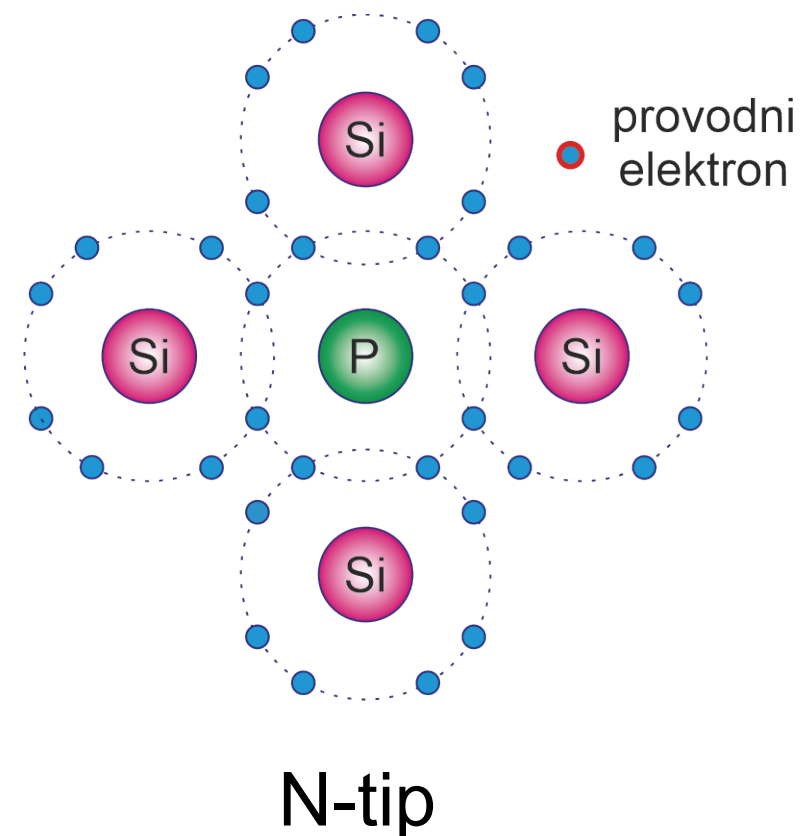
# Dopirani poluprovodnik

- Dodavanjem elemenata III ili V grupe poluprovodniku (**dopanti**), menjaju se njegova provodna svojstva – **dopiranje**.

III	IV	V
<p>Bor <b>B</b> * 10.81</p>	<p>Ugljenik <b>C</b> * 12.01</p>	<p>Azot <b>N</b> *** 14.01</p>
<p>Aluminijum <b>Al</b> * 26.98</p>	<p>Silicijum <b>Si</b> * 28.09</p>	<p>Fosfor <b>P</b> * 30.97</p>
<p>Galijum <b>Ga</b> * 69.72</p>	<p>Germanijum <b>Ge</b> * 72.63</p>	<p>Arsenik <b>As</b> * 74.92</p>

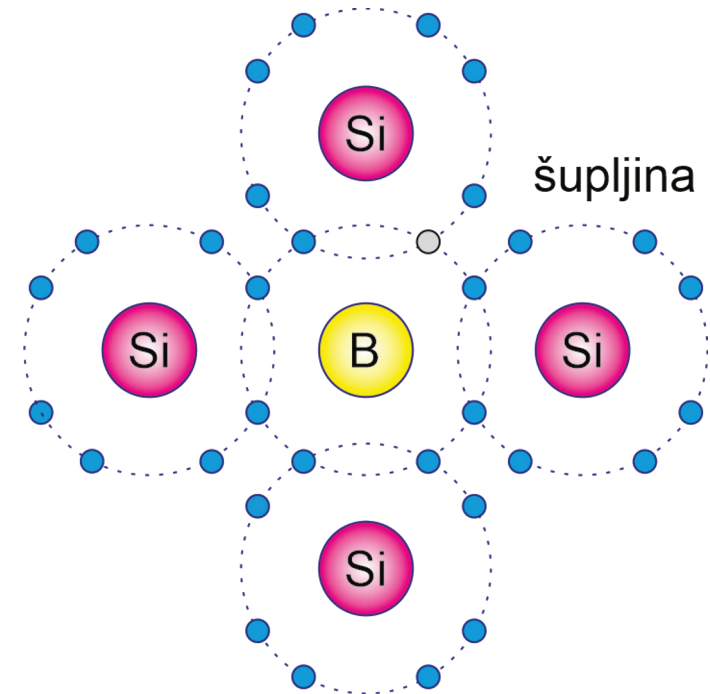
# Dopirani poluprovodnik n-tipa

- Dopanti V grupe elemenata (na primer fosfor, P) se nazivaju **donori**. Poluprovodnik koji je dopiran donorima se naziva **poluprovodnik n-tipa**.
- Donori imaju pet valentna elektrona. Elektron koji ne učestvuje u kovalentnoj vezi lako prelazi u provodnu zonu i doprinosi provodnosti poluprovodnika – **provodni elektron**.
- **Većinski nosioci** naelektrisanja kod poluprovodnika n-tipa su elektroni.



# Dopirani poluprovodnik p-tipa

- Dopanti III grupe elemenata (na primer bor, B) se nazivaju **akceptorima**. Poluprovodnik koji je dopiran akceptorima se naziva **poluprovodnik p-tipa**.
- Akseptori imaju tri valentna elektrona. Nedostatak jednog valentnog elektrona u kristalnoj rešetki poluprovodnika predstavlja **šupljinu**, koja se efektivno ponaša kao slobodno pozitivno naelektrisanje.
- **Većinski nosioci** naelektrisanja kod poluprovodnika p-tipa su šupljine.



# Dopirani poluprovodnik

- Dopiranje poluprovodnika povećava koncentraciju slobodnih nosilaca naelektrisanja (šupljina i elektrona). Električna neutralnost je pri tome očuvana.
- Koncentracija donora ( $N_D$ ) u poluprovodniku n-tipa i koncentracija akceptora ( $N_A$ ) u poluprovodniku p-tipa je nekoliko reda veličine veća od intrisične koncentracije  $n_i$ . ( $10^{15} - 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ).
- Zbog **rekombinacije**, u dopiranim poluprovodnicima, proizvod koncentracije elektrona ( $n$ ) i koncentracije šupljina ( $p$ ) je konstantan:

$$n \cdot p = n_i^2$$

# Dopirani poluprovodnik n-tipa

- Poluprovodnik n-tipa ima veliku koncentraciju elektrona ( $n$ ), koja je približno jednaka koncentraciji dopanata (donora):

$$N_D \gg n_i, \quad n = N_D.$$

- Koncentracija slobodnih šupljina ( $p$ ) je znatno manja:

$$n \cdot p = N_D \cdot p = n_i^2.$$

$$p = \frac{n_i^2}{N_D}.$$

# Dopirani poluprovodnik p-tipa

- Poluprovodnik p-tipa ima veliku koncentraciju šupljina ( $p$ ), koja je približno jednaka koncentraciji dopanata (akceptora):

$$N_A \gg n_i, \quad p = N_A.$$

- Koncentracija slobodnih elektrona ( $n$ ) je znatno manja:

$$n \cdot p = n \cdot N_A = n_i^2.$$

$$n = \frac{n_i^2}{N_A}.$$

# Kretanje nosilaca naelektrisanja

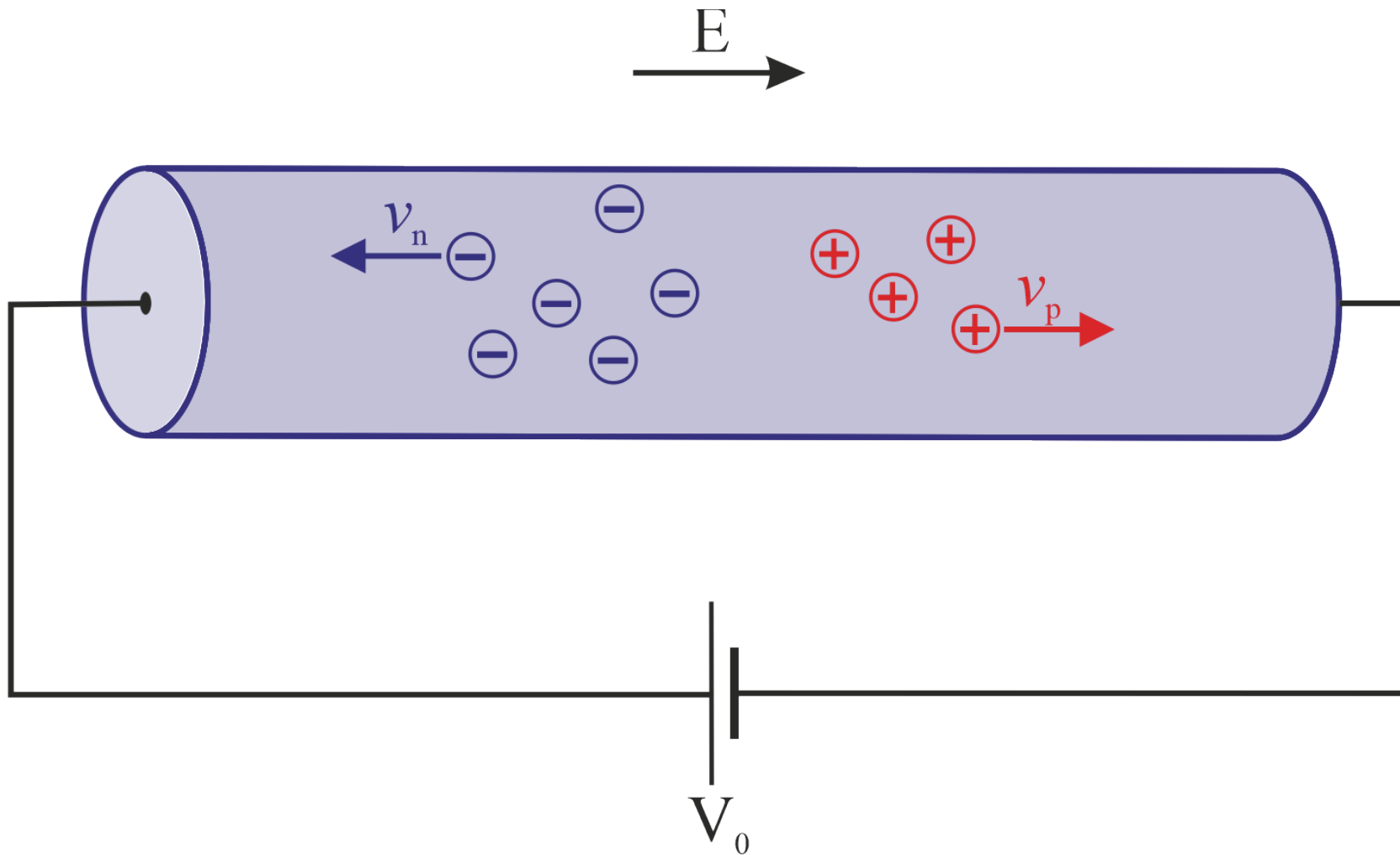
- U poluprovodnicima postoje dva fizička mehanizma kretanja naelektrisanih čestica – **drift** i **difuzija**.
- **Drift** je kretanje nosilaca naelektrisanja pod dejstvom sila električnog polja. Pod dejstvom električnog polja, elektroni u poluprovodniku se kreću kao i u metalima. Provodnost poluprovodnika zavisi od temperature i koncentracije dopanata. Struja drifta je **kondukciona struja**.
- **Difuzija** je kretanje nosilaca naelektrisanja usled difuzije – prelaska čestica iz oblasti veće koncentracije u oblast manje koncentracije. Struja difuzije je **konvekciona struja**.



# Kretanje nosilaca naelektrisanja – drift

- Kada se zatvori električno kolo, u poluprovodniku se uspostavlja električno polje  $\mathbf{E}$ . Pod dejstvom električnog polja, pozitivno naelektrisane čestice (šupljine) se kreću u pravcu polja, a negativno naelektrisani elektroni u suprotnom smeru.
- Električno polje ubrzava nosioce naelektrisanja, koji se prilikom kretanja kroz kristalnu rešetku sudaraju sa atomima u kristalu.
- Sila otpora usled rasejanja na atomima u kristalnoj rešetki zavisi od brzine nosilaca i ima suprotan smer u odnosu na smer kretanja nosilaca naelektrisanja.
- Kada se intenziteti sila otpora i električnog polja izjednače, nosioci naelektrisanja se kreću konstantnom brzinom.

# Kretanje nosilaca naelektrisanja – drift



# Kretanje nosilaca naelektrisanja – drift

- Brzine nosilaca naelektrisanja linearno zavise od električnog polja:

$$\vec{v}_n = -\mu_n \cdot \vec{E}$$

$$\vec{v}_p = \mu_p \cdot \vec{E}$$

- Konstante proporcionalnosti se nazivaju **pokretljivost elektrona** ( $\mu_n$ ) i **pokretljivost šupljina** ( $\mu_p$ ). Ove konstante zavise od tipa poluprovodnika, za silicijum iznose:

$$\mu_n = 1350 \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}, \quad \mu_p = 480 \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}$$

# Kretanje nosilaca naelektrisanja – drift

- Kako bi struja drifta bila određena, potrebno je odrediti količinu naelektrisanja koja protiče u jedinici vremena.
- Element zapremine  $dV$ , jednaka proizvodu površine poprečnog preseka  $s$  i elementa dužine  $dl$ , sadrži količinu naelektrisanja  $dQ$  koja je proporcionalna koncentraciji elektrona  $n$ .
- Elektroni se kreću brzinom  $v_n$ ; u infinitezimalnom intervalu vremena  $dt$  prelaze razdaljinu  $dl$ .
- Električno polje je jednako negativnom gradijentu napona:

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} v = -\frac{dv}{dl} \hat{l}.$$

# Kretanje nosilaca naelektrisanja – drift

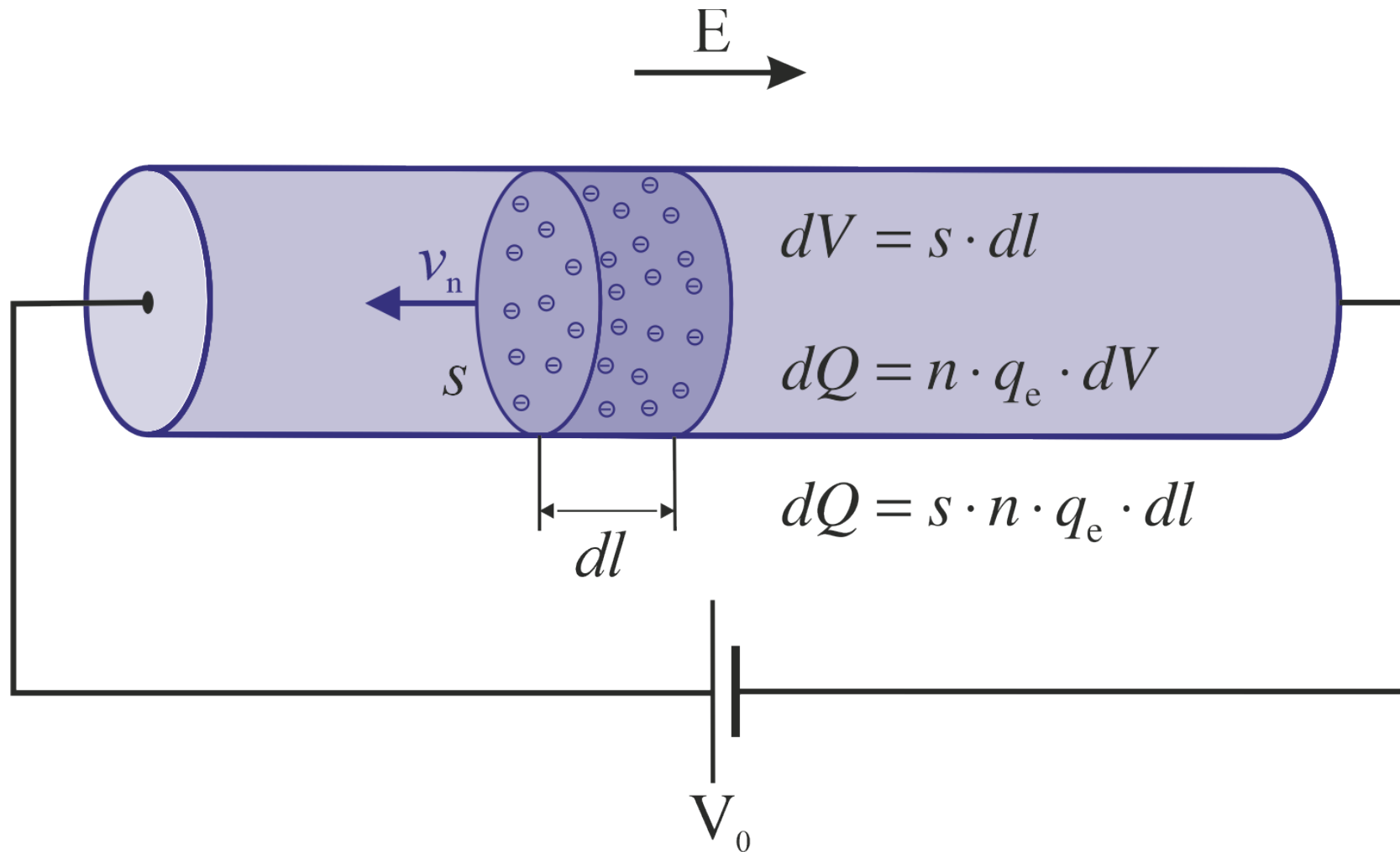
- Napon je jednak negativnom integralu električnog polja po dužini poluprovodnika.

$$v = -\int \vec{E} \cdot d\vec{l}.$$

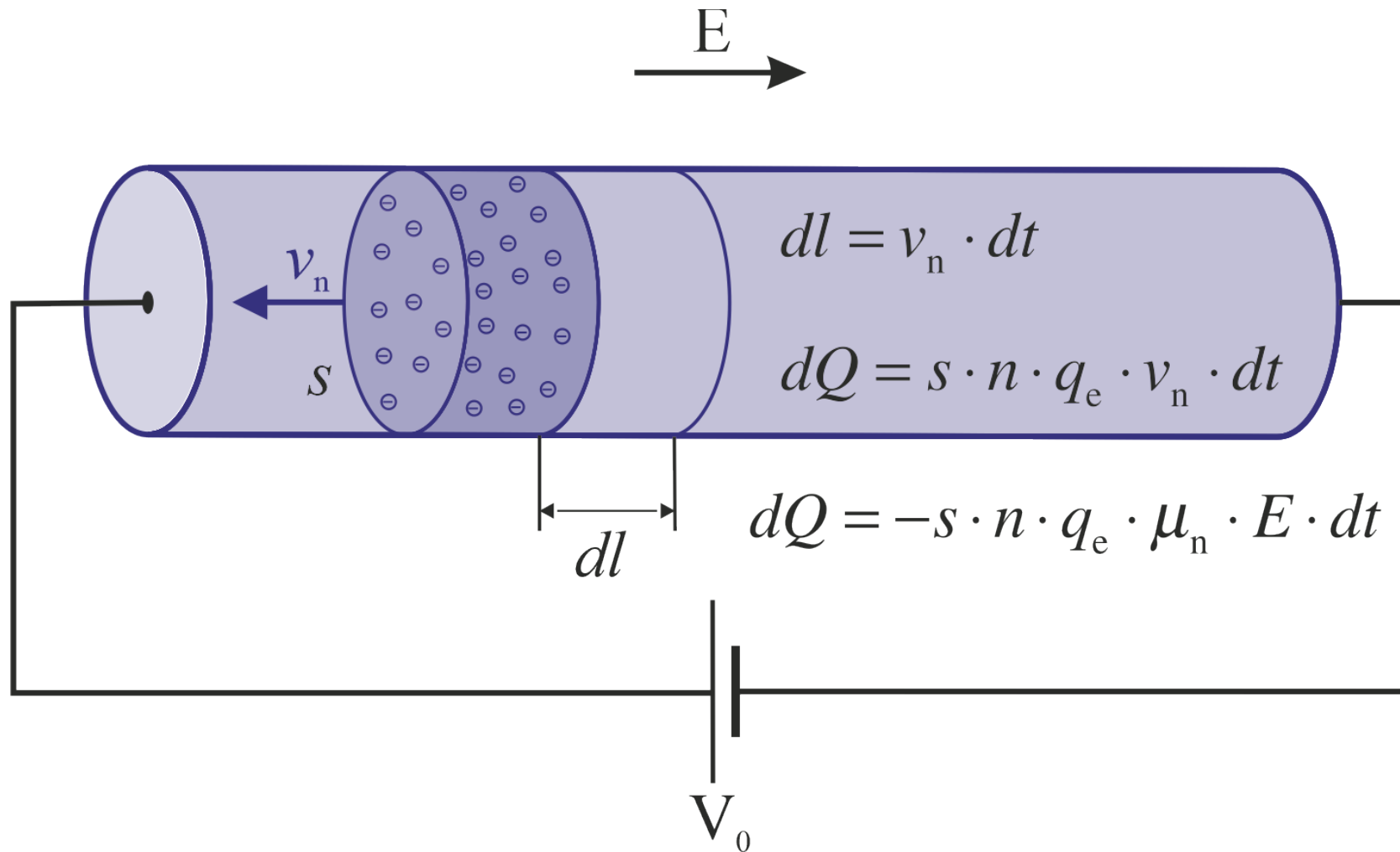
- Kako je poluprovodnik homogen, električno polje u poluprovodniku je uniformno, napon je:

$$V_0 = -\int_0^L E \cdot dl = -E \cdot L$$

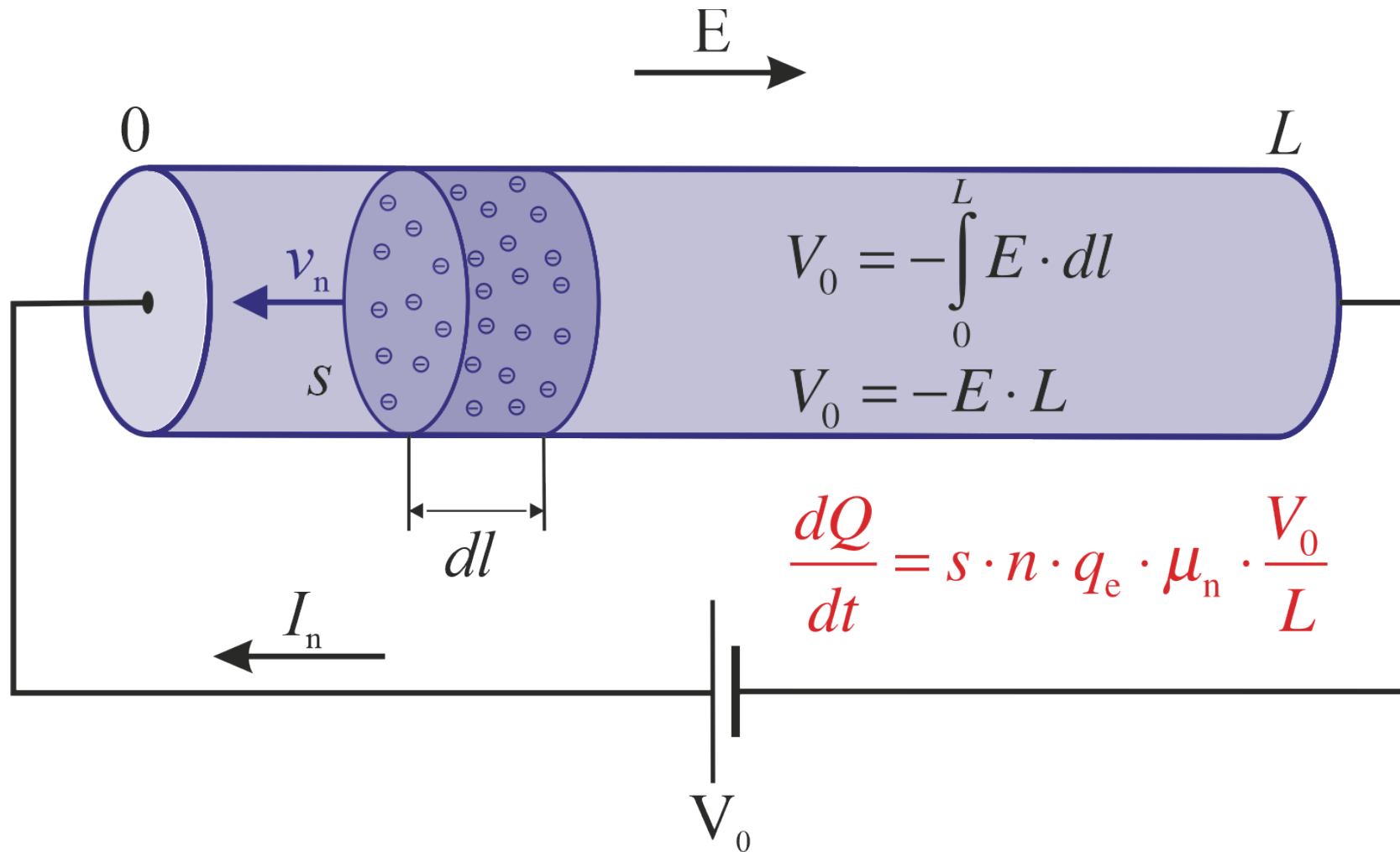
# Kretanje nosilaca naelektrisanja – drift



# Kretanje nosilaca naelektrisanja – drift



# Kretanje nosilaca naelektrisanja – drift





# Struja drifta

- Struja drifta elektrona jednaka je ukupnom naelektrisanju elektrona koji protiču kroz poprečni presek poluprovodnika u vremenu:

$$I_n = \frac{dQ}{dt} = s \cdot n \cdot q_e \cdot \mu_n \cdot \frac{1}{L} \cdot V_0.$$

- Slična analiza se može sprovesti i za šupljine:

$$I_p = \frac{dQ}{dt} = s \cdot p \cdot q_e \cdot \mu_p \cdot \frac{1}{L} \cdot V_0.$$

# Struja drifta

- Ukupna struja drifta jednaka je zbiru struja elektrona i šupljina:

$$I = I_n + I_p = (n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p) \cdot q_e \cdot \frac{S}{L} \cdot V_0.$$

- Prema Omovom zakonu, struja je jednaka proizvodu napona i provodnosti, tako da je:

$$G = (n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p) q_e \cdot \frac{S}{L} = \sigma \cdot \frac{S}{L}.$$

# Specifična provodnost poluprovodnika

- Specifična provodnost poluprovodnika je:

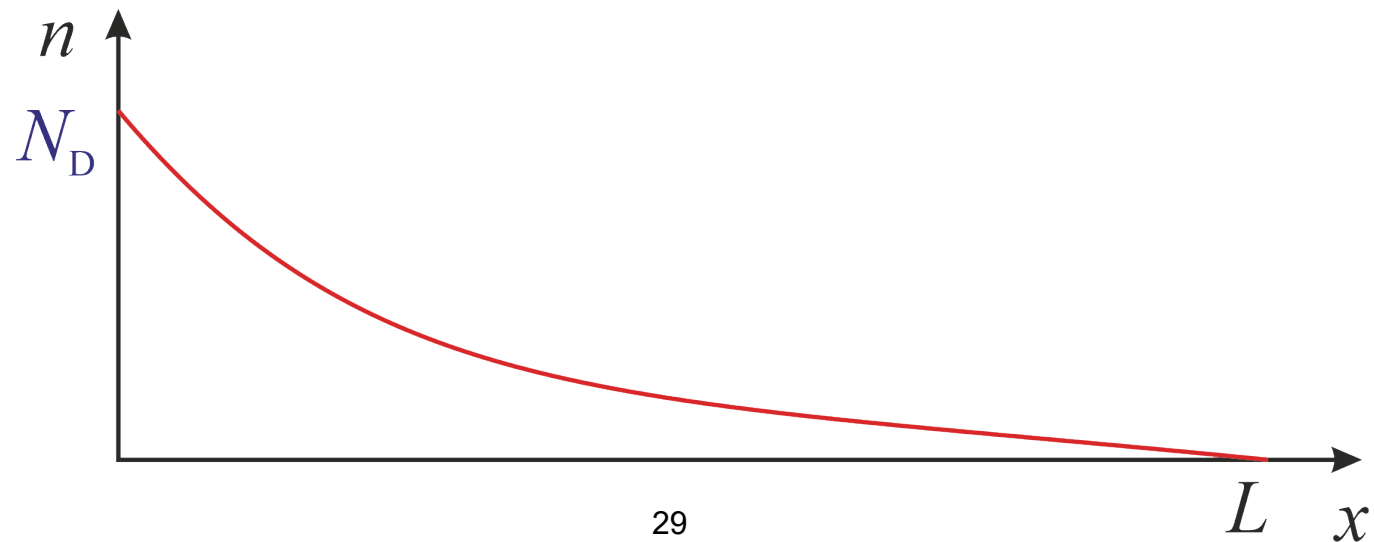
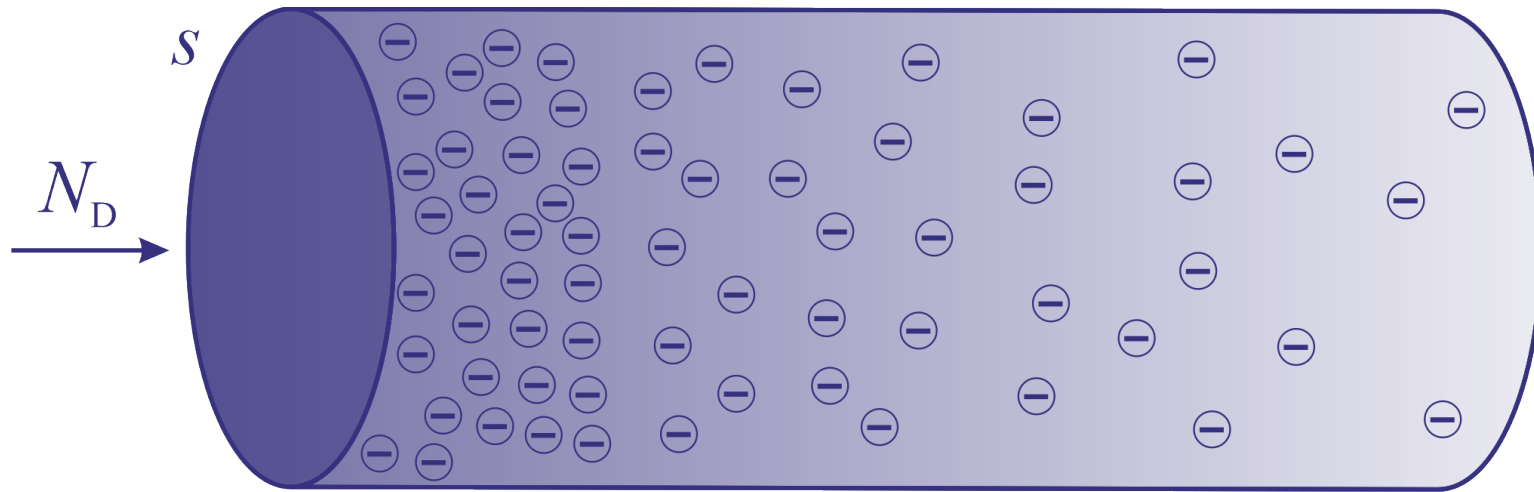
$$\sigma = (n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p) q_e.$$

- Poluprovodnik se ponaša kao provodni materijal (metal) sa specifičnom otpornošću  $\sigma$ . Provodnost zavisi od koncentracija nosilaca.
- Dopiranjem poluprovodnika se povećava provodnost poluprovodnika.

# Kretanje nosilaca naelektrisanja – difuzija

- Koncentracija nosilaca naelektrisanja (elektrona i šupljina) se može menjati dopiranjem. Ovo omogućuje realizaciju heterogenih struktura poluprovodnika, sa različitim koncentracijama nosilaca.
- Ukoliko u poluprovodniku postoje oblasti sa različitim koncentracijama nosilaca, pojaviće se **difuzija** – kretanje nosilaca naelektrisanja iz oblasti veće koncentracije u oblast manje koncentracije.
- Kretanje naelektrisanja izazvano difuzijom stvara konvekcionsu struju – **struju difuzije**.

# Kretanje nosilaca naelektrisanja – difuzija



# Kretanje nosilaca naelektrisanja – difuzija

- Struja difuzije je proporcionalna negativnom gradijentu koncentracije naelektrisanja:

$$I_{D,n} \approx -\frac{dn}{dx}$$

- Struja zavisi i od površine poprečnog preseka,  $s$ , i elementarnog naelektrisanja  $-q_e$ . Konstanta proporcionalnosti se naziva **difuzibilnost elektrona ( $D_n$ )**:

$$I_{D,n} = s \cdot q_e \cdot D_n \cdot \frac{dn}{dx}$$

# Struja difuzije

- Struja difuzije za šupljine se može naći ekvivalentnom analizom:

$$I_{D,p} \approx -\frac{dp}{dx}$$

- Konstanta proporcionalnosti je **difuzibilnost šupljina ( $D_p$ )**:

$$I_{D,p} = -s \cdot q_e \cdot D_p \cdot \frac{dp}{dx}$$

# Struja difuzije

- Ukupna struja difuzije jednaka je zbiru struja difuzija elektrona i šupljina:

$$I_D = s \cdot q_e \cdot \left( D_n \cdot \frac{dn}{dx} - D_p \cdot \frac{dp}{dx} \right).$$

- Odnos difuzibilnosti i pokretljivosti je konstantan i jednak termalnom naponu (**Ajnštajnova relacija**):

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{q_e}.$$