

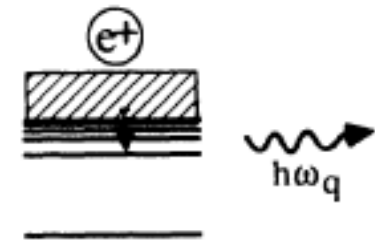
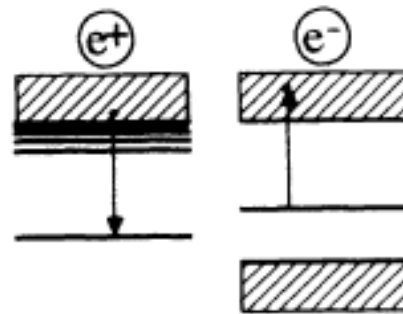
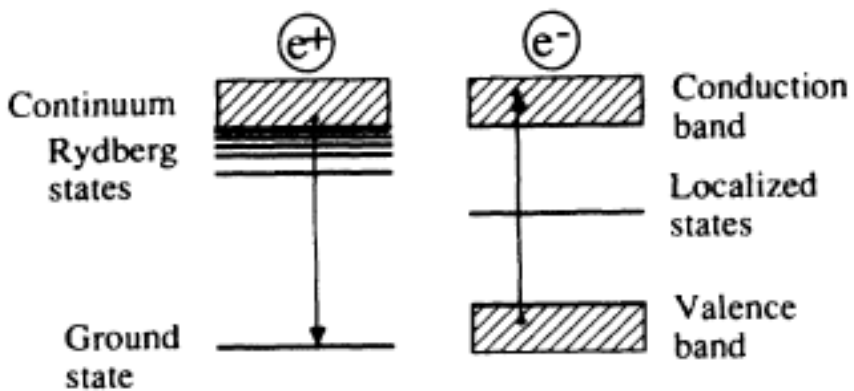
Anihilace pozitronů v polovodičích

- záchyt pozitronů ve vakancích
- mechanismy uvolnění vazebné energie:

1. tvorba páru elektron-díra

2. ionizace vakance

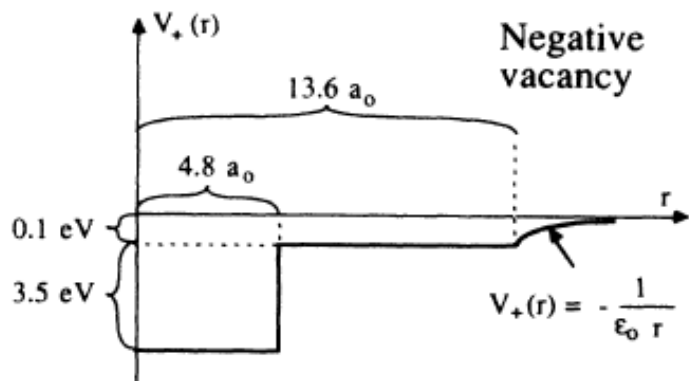
3. emise fononu



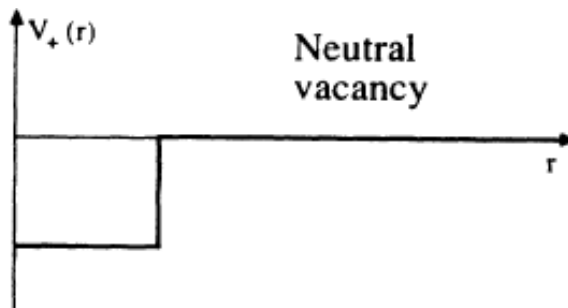
Anihilace pozitronů v polovodičích

- záchyt pozitronů ve vakancích
- nábojový stav vakance:

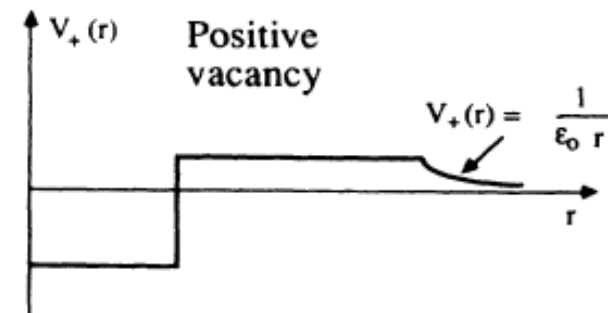
1. záporně nabitá vakance



2. neutrální vakance

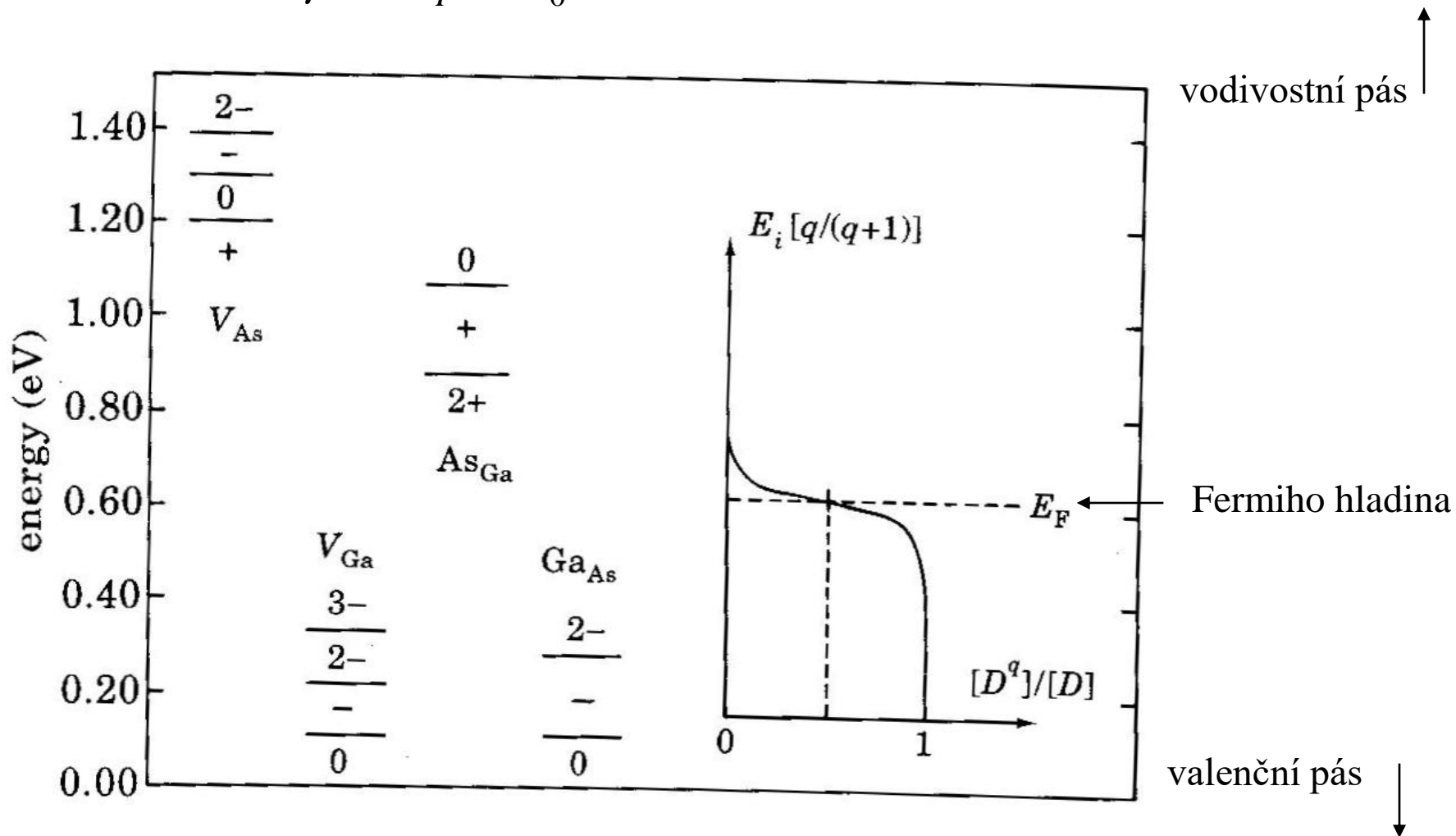


3. kladně nabitá vakance



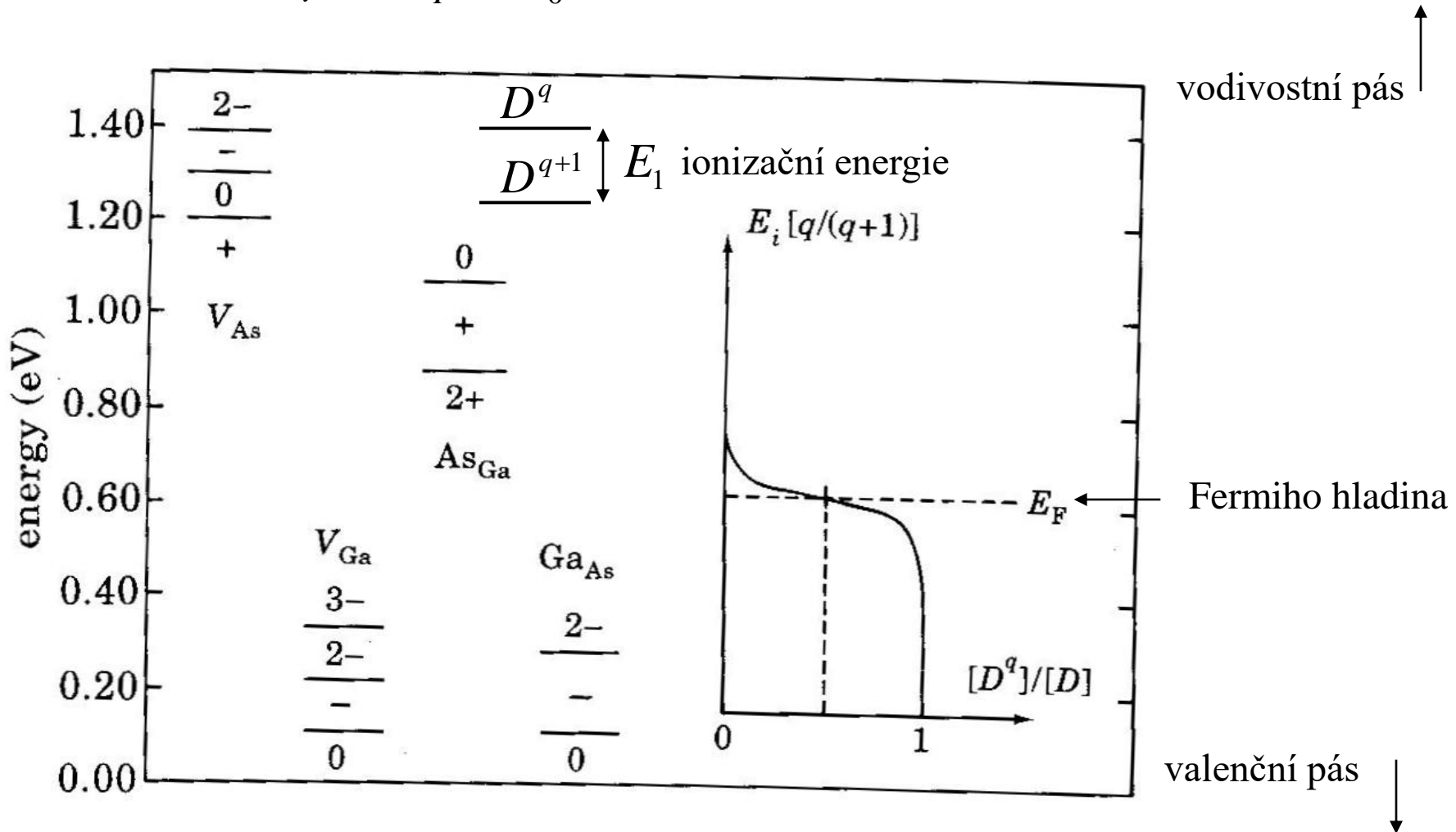
Anihilace pozitronů v polovodičích

- defekty v GaAs
- Fermiho energie $\mu = E_F - E_0$ chemický potenciál e^-



Anihilace pozitronů v polovodičích

- defekty v GaAs
- Fermiho energie $\mu = E_F - E_0$ chemický potenciál e^-



Anihilace pozitronů v polovodičích

- defekty v GaAs

- Fermiho energie $\mu = E_F - E_0$ chemický potenciál e^-

$$\frac{D^q}{D^{q+1}} \updownarrow E_1 \text{ ionizační energie}$$

- poměr koncentrací $\frac{[D^q]}{[D^{q+1}]} = \frac{Z(q)}{Z(q+1)} \exp\left(-\frac{E_1 - E_F}{kT}\right)$

- $Z(q)$ – stupeň degenerace

- koncentrace $\frac{[D^q]}{[D]} = \frac{1}{1 + \frac{Z(q+1)}{Z(q)} \exp\left(\frac{E_1 - E_F}{kT}\right)}$ $\frac{[D^{q+1}]}{[D]} = \frac{1}{1 + \frac{Z(q)}{Z(q+1)} \exp\left(-\frac{E_1 - E_F}{kT}\right)}$

- $E_F - E_1 = 4 kT$: 97 % vakancí v nábojovém stavu D^q

Anihilace pozitronů v polovodičích

- defekty v GaAs
- více nábojových stavů defektu

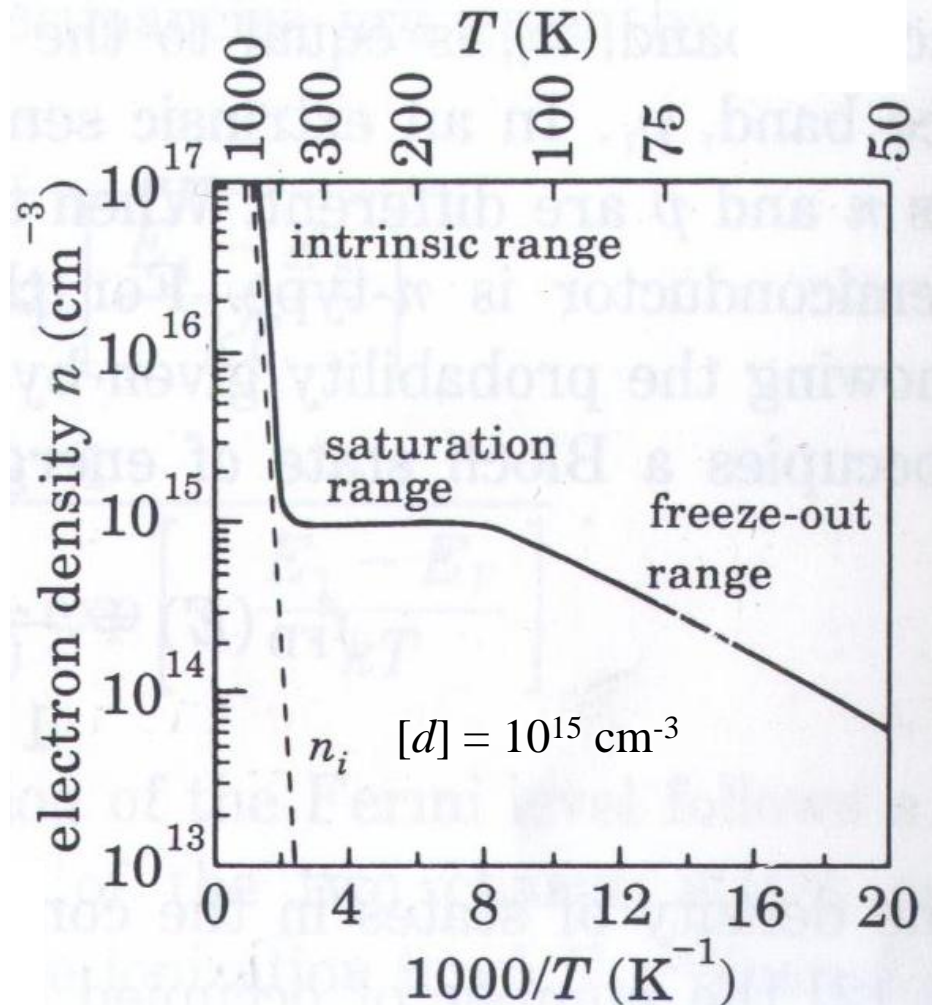
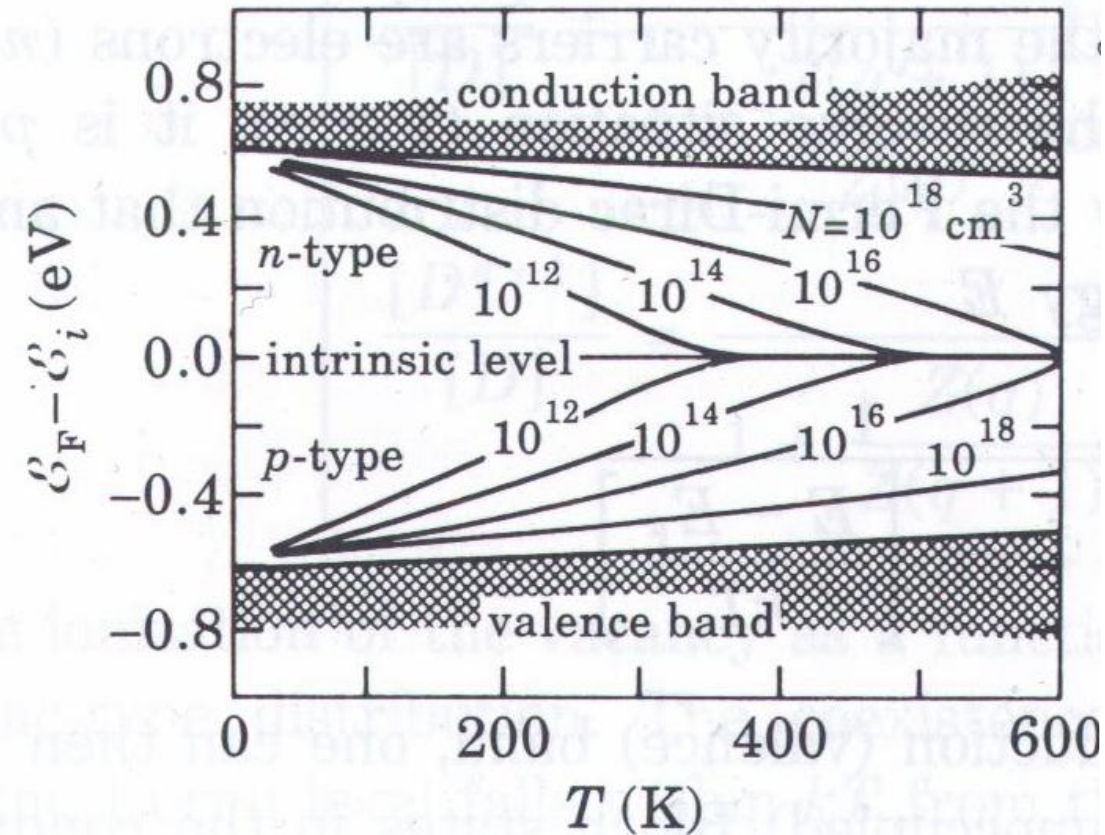
$$\frac{D^{q-l+1}}{\vdots} \frac{D^{q+1}}{D^q} \quad E_i \text{ ionizační energie} \\ i = 1, \dots, l$$

- koncentrace

$$\frac{[D^{q-i+1}]}{[D]} = \frac{\prod_{j=1}^i \left[\frac{D^{q-j+1}}{D^{q-j+2}} \right]}{1 + \sum_{i=1}^l \prod_{j=1}^i \left[\frac{D^{q-j+1}}{D^{q-j+2}} \right]}$$

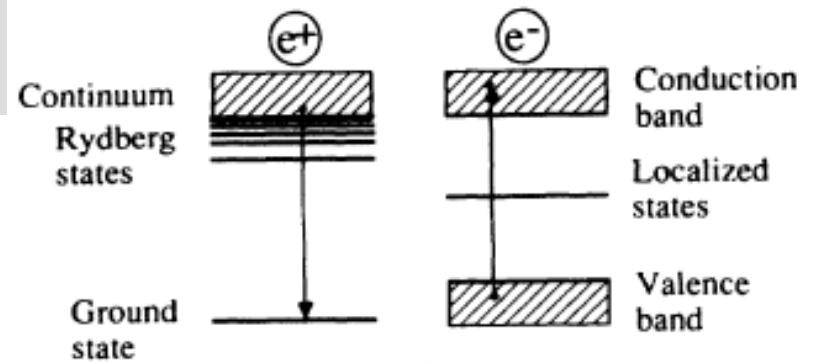
Anihilace pozitronů v polovodičích

- defekty v Si
- poloha Fermiho hladiny

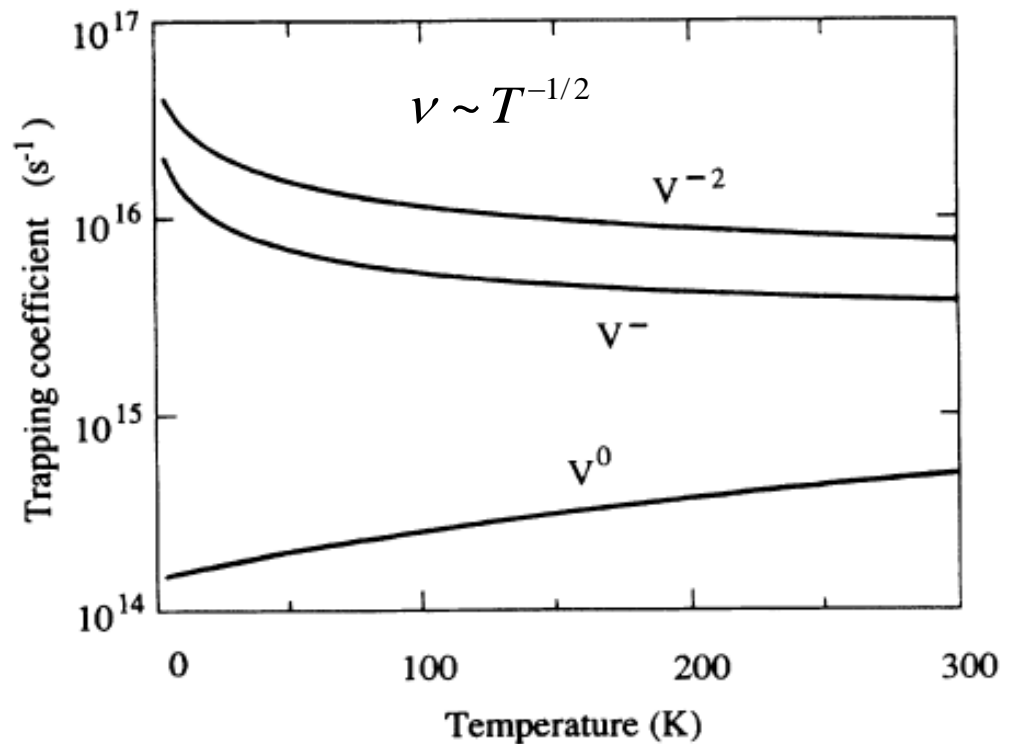
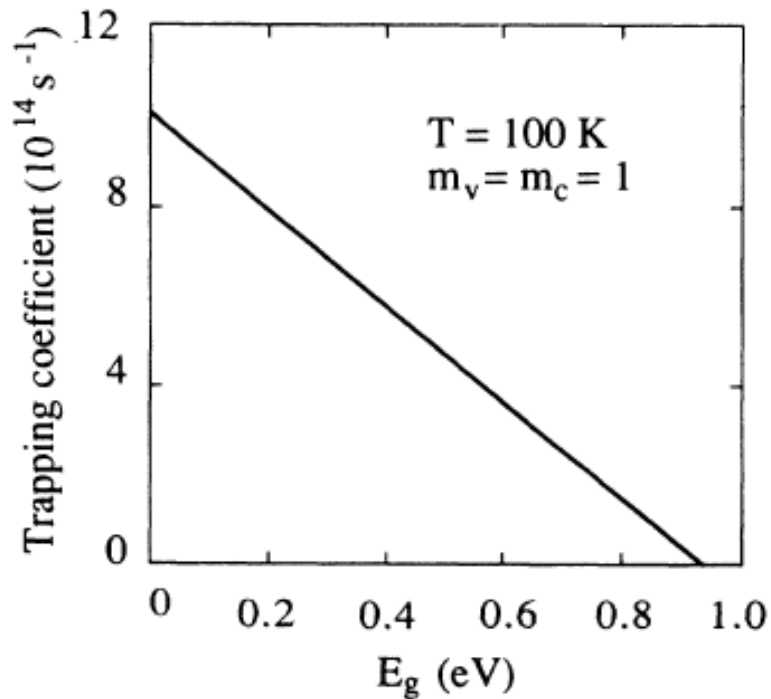


Anihilace pozitronů v polovodičích

- záchyt pozitronů ve vakancích
- mechanismus uvolnění energie: tvorba páru elektron-díra
- závislost specifické záchytové rychlosti na šířce zakázaného pásu

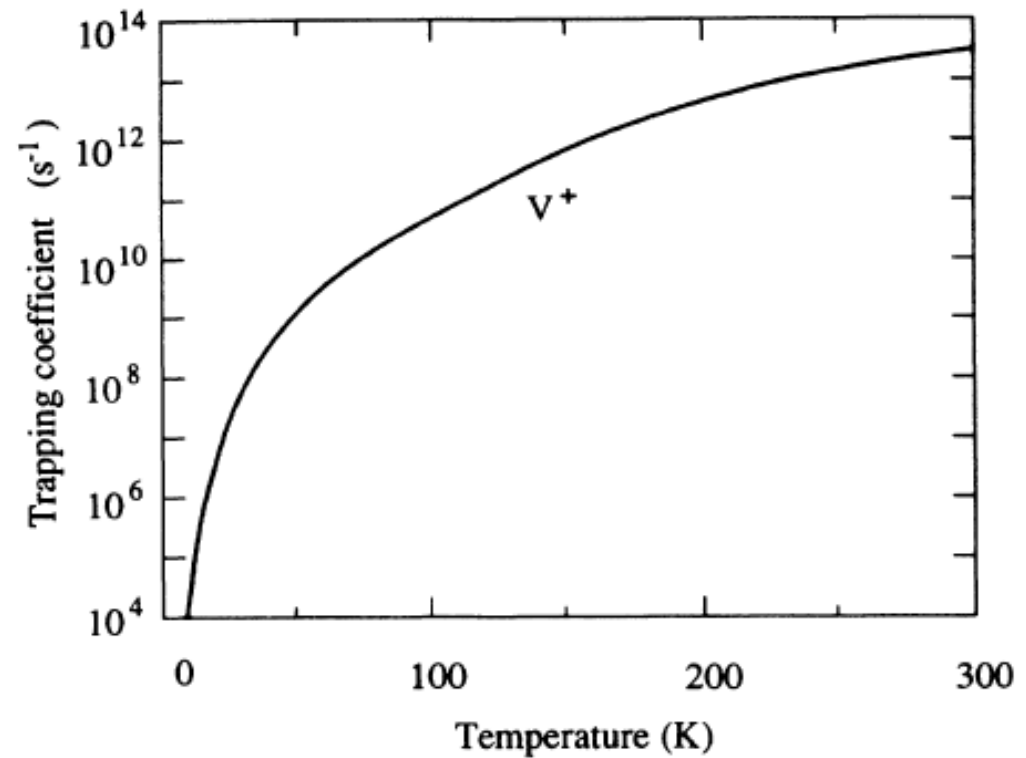
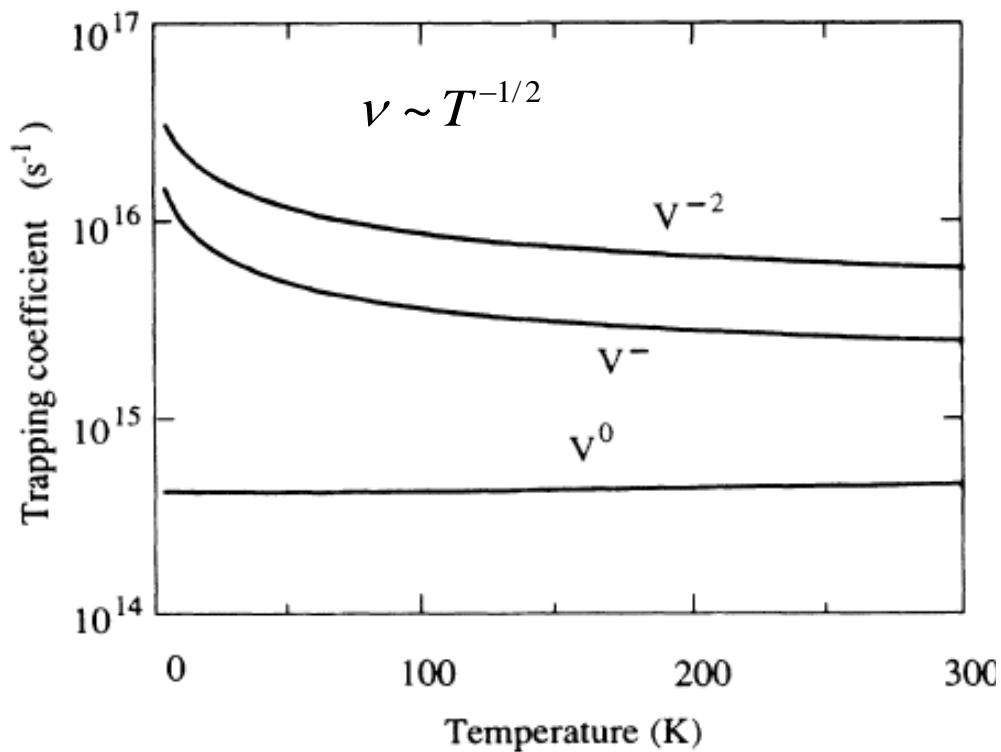
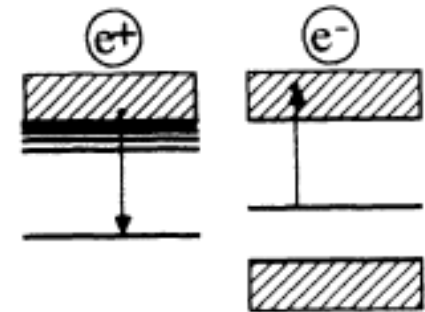


- teplotní závislost specifické záchytové rychlosti



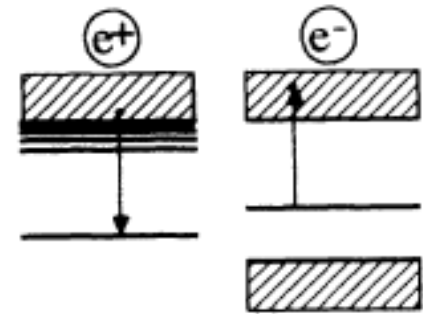
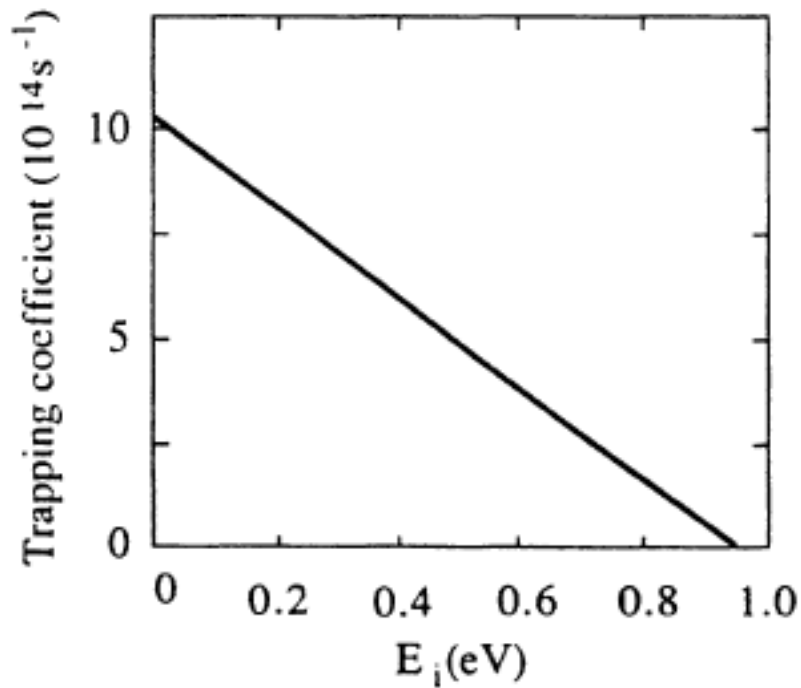
Anihilace pozitronů v polovodičích

- záchyt pozitronů ve vakancích
- mechanismus uvolnění energie: ionizace vakance
- teplotní závislost specifické záchytové rychlosti



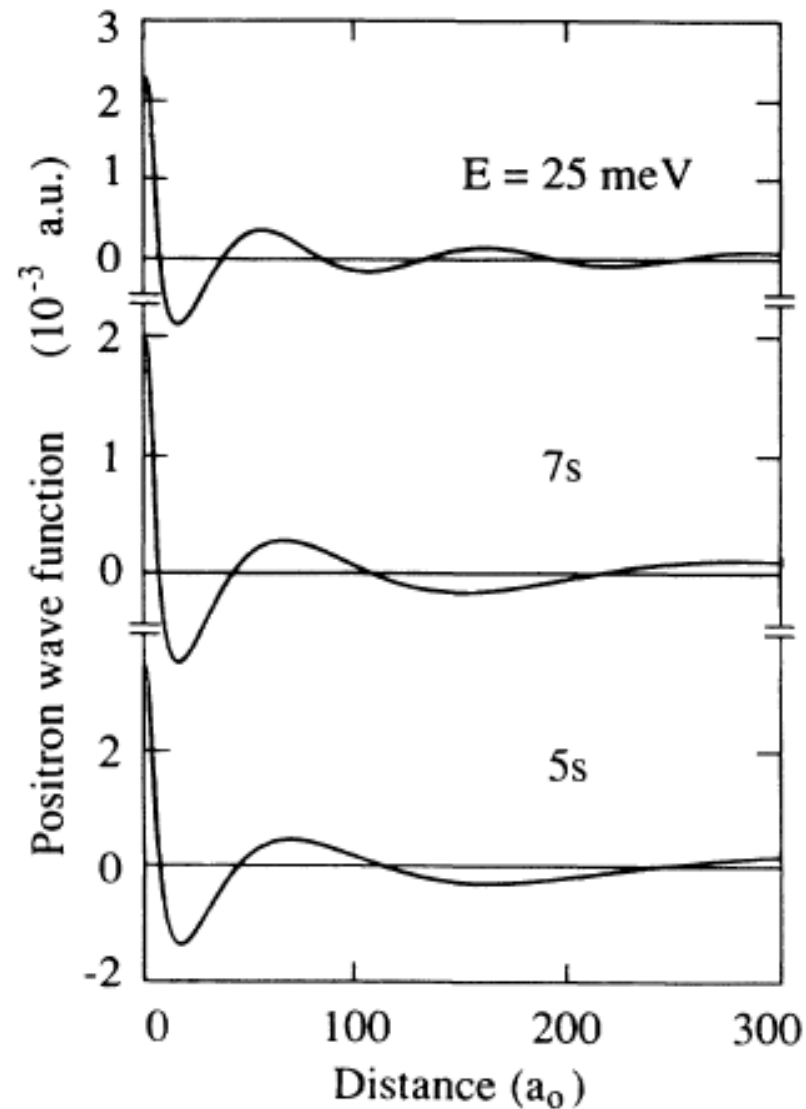
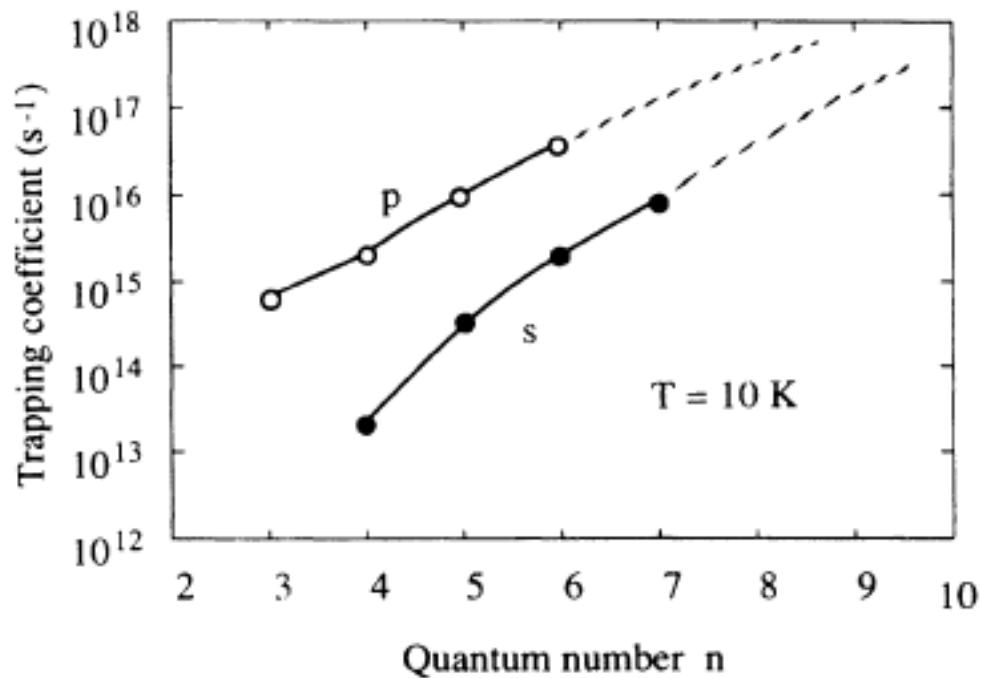
Anihilace pozitronů v polovodičích

- záchyt pozitronů ve vakancích
- mechanismus uvolnění energie: ionizace vakance
- závislost specifické záchytové rychlosti pro V^0 na vazebné energii elektronu



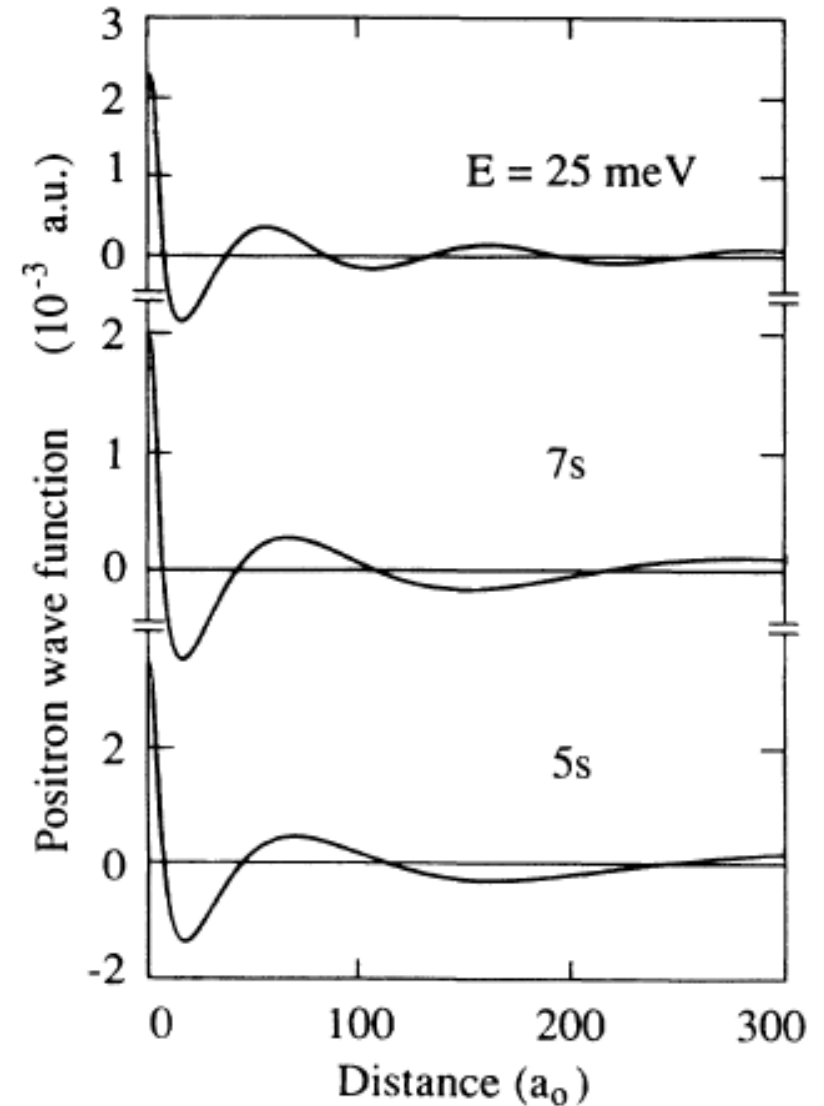
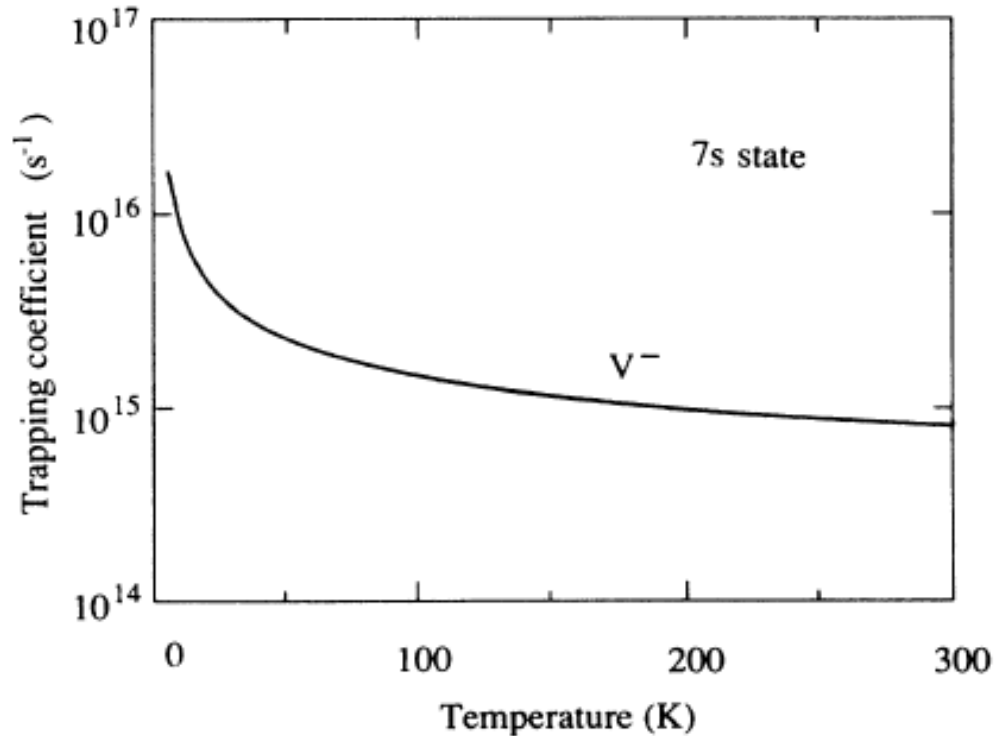
Anihilace pozitronů v polovodičích

- záchyt pozitronů v Rydbergových stavech
- mechanismus uvolnění energie: emise fononu
- závislost specifické záchytové rychlosti na hlavním kvantovém čísle



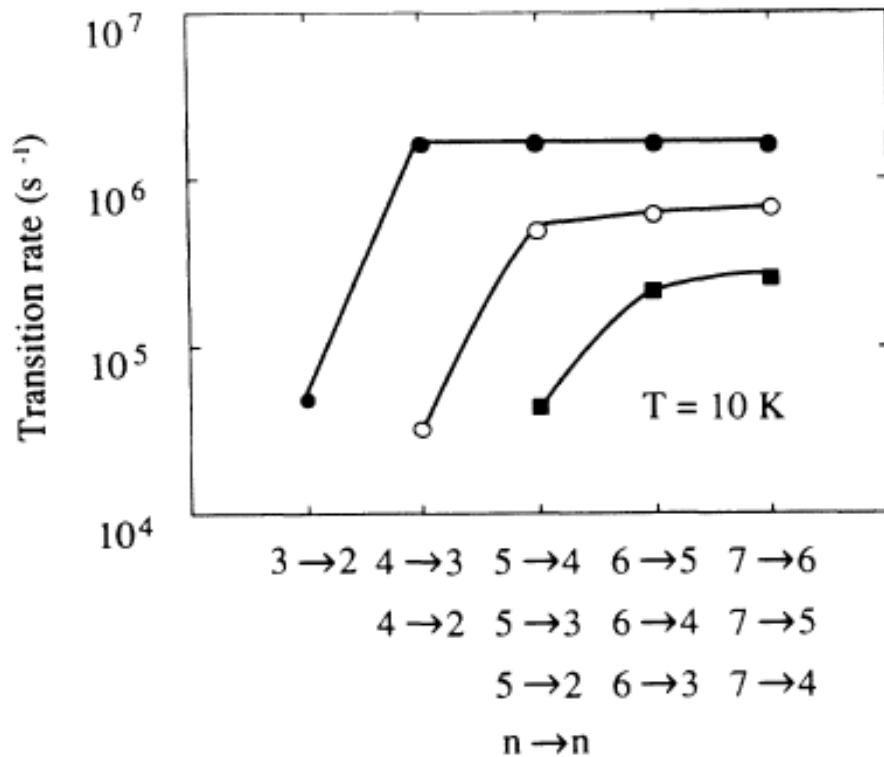
Anihilace pozitronů v polovodičích

- záchyt pozitronů v Rydbergových stavech
- mechanismus uvolnění energie: emise fononu
- teplotní závislost specifické záchytové rychlosti



Anihilace pozitronů v polovodičích

- záchyt pozitronů v Rydbergových stavech
- přechod mezi Rydbergovými stavy
- frekvence přechodů $n \rightarrow n'$ mezi s -Rydbergovými stavy



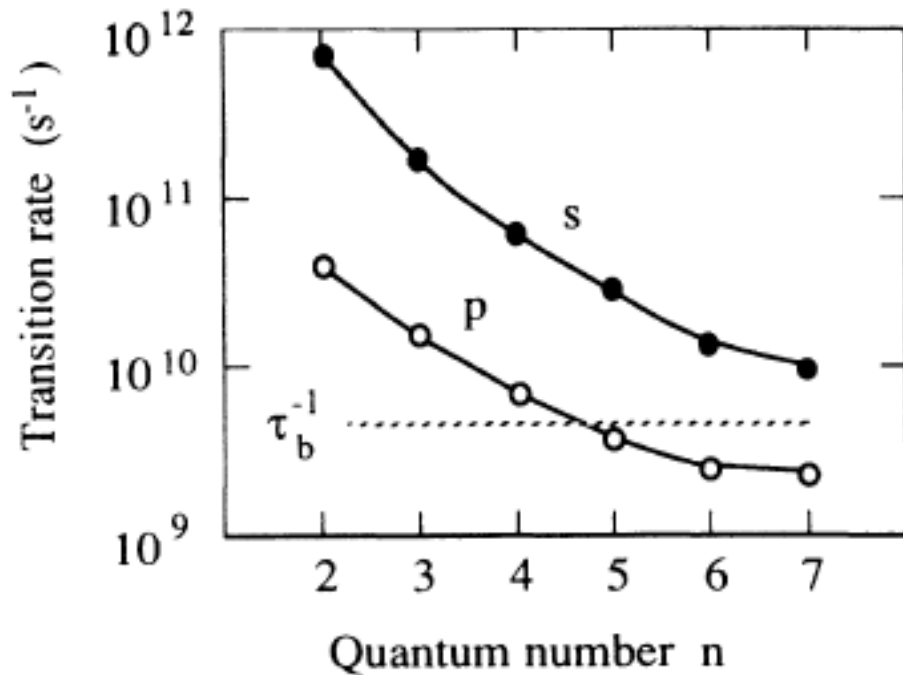
- anihilační rychlost $\lambda_b \approx (3 - 5) \times 10^9 \text{ s}^{-1}$



k přechodům mezi Rydbergovými stavy
nedochází

Anihilace pozitronů v polovodičích

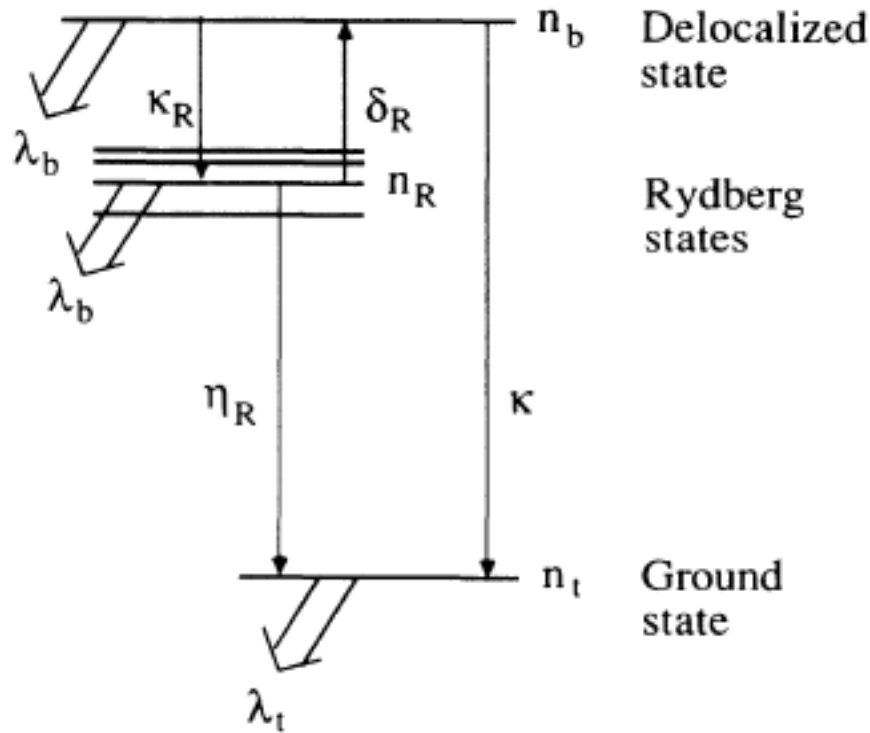
- záchyt pozitronů v Rydbergových stavech
- přechod mezi Rydbergovým stavem a základním stavem
- frekvence přechodů mezi n Rydbergovým stavem a základním stavem



- anihilační rychlost $\lambda_b \approx (3 - 5) \times 10^9 \text{ s}^{-1}$

Anihilace pozitronů v polovodičích

- záchytný model pro V



$$\frac{dn_b}{dt} = (-\lambda_b - K_R - K)n_b + \delta_R n_R$$

$$\frac{dn_R}{dt} = (-\lambda_b - \delta_R - \eta_R)n_R + K_R n_b$$

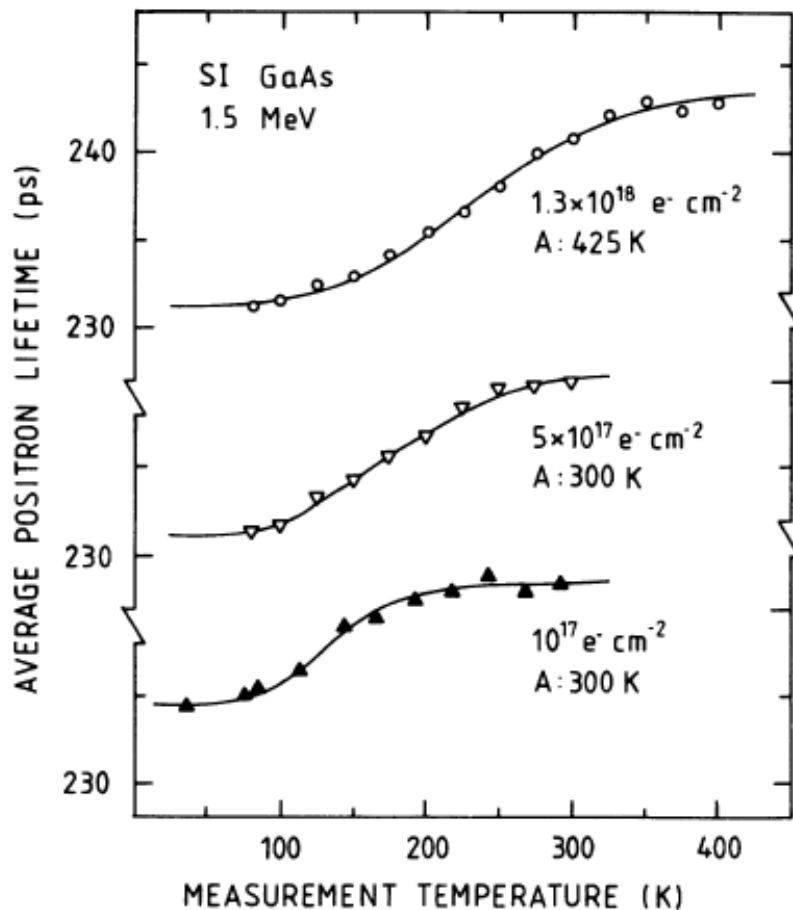
$$\frac{dn_t}{dt} = -\lambda_t n_t + \eta_R n_R + K n_b$$

$$\delta_R(T) = \frac{K_R}{c_v} \left(\frac{mkT}{2\pi\eta^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_B}{kT}\right)$$

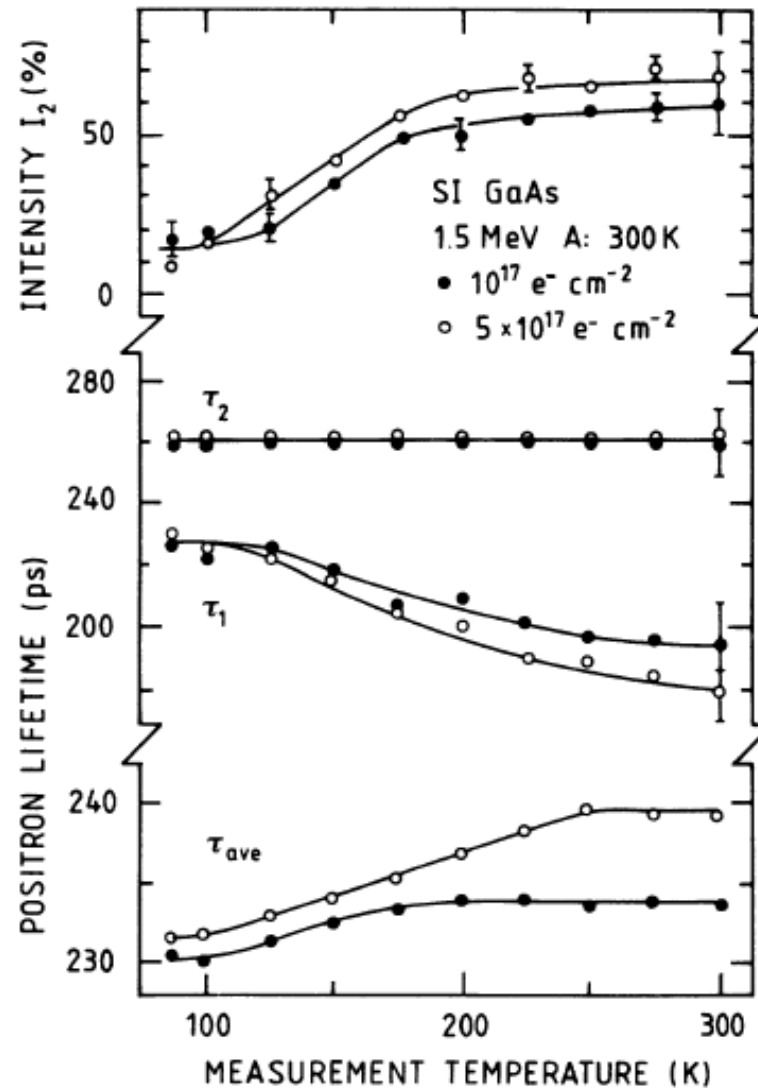
Anihilace pozitronů v polovodičích

- GaAs ozářený elektrony (1.5 MeV)

střední doba života

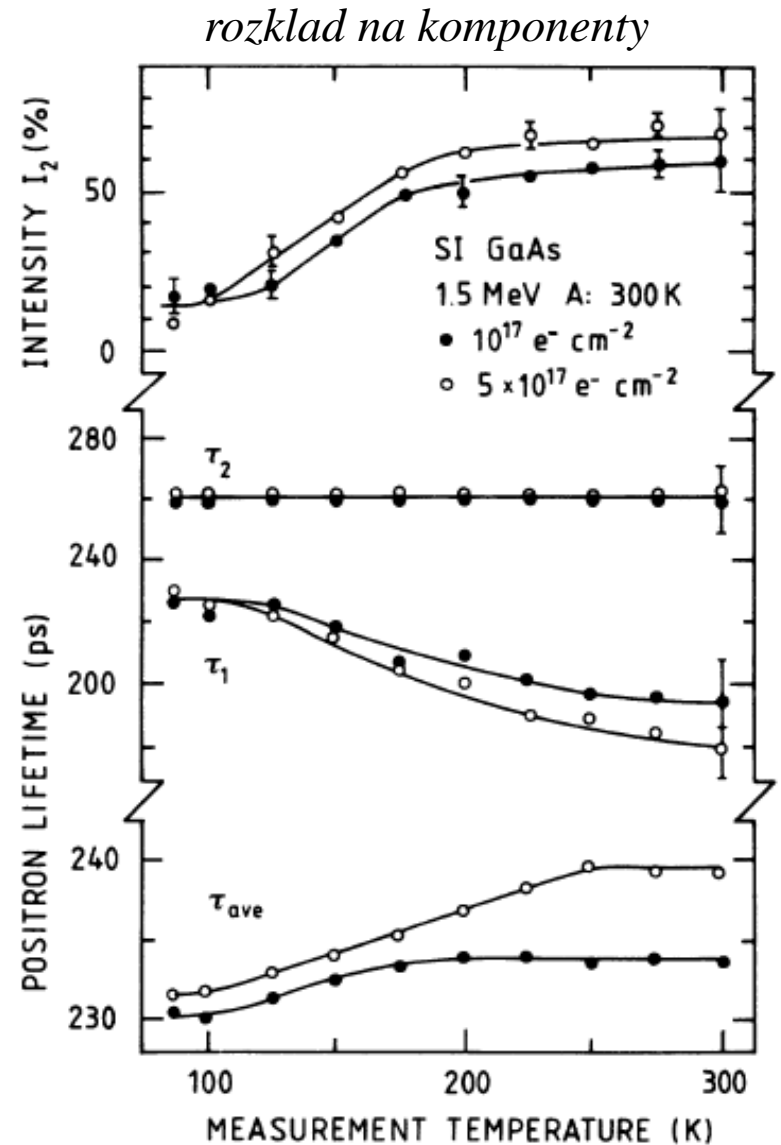


rozklad na komponenty



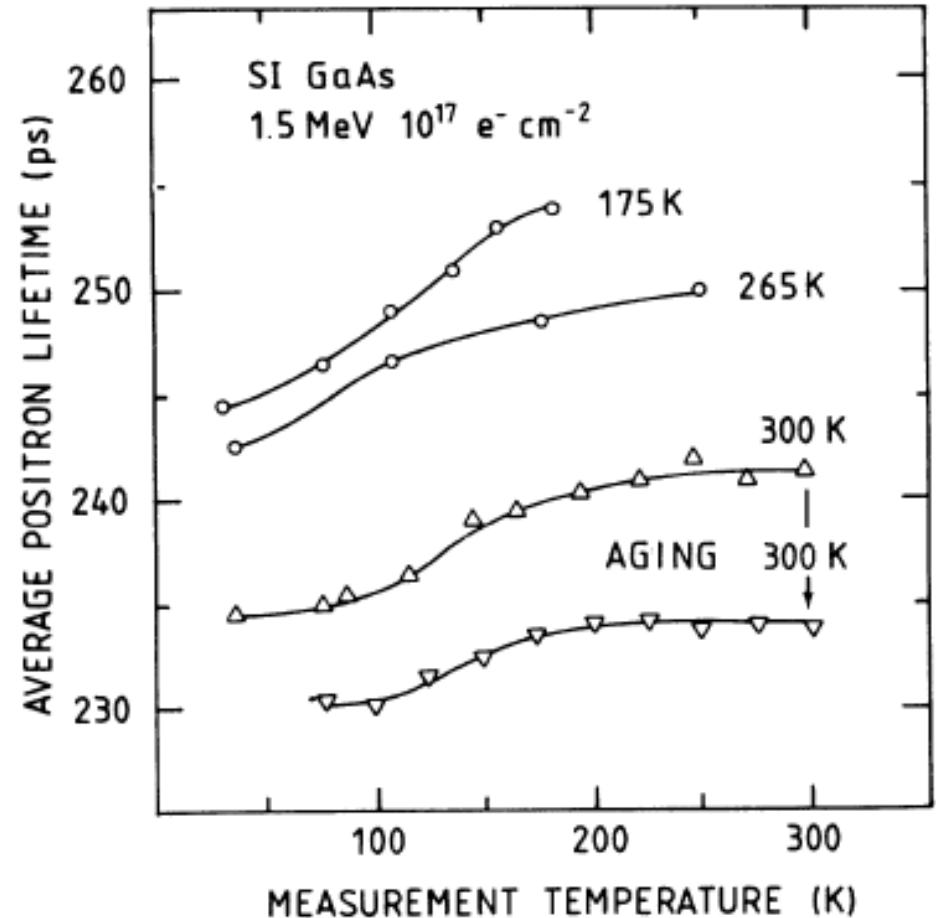
Anihilace pozitronů v polovodičích

- GaAs ozářený elektrony (1.5 MeV)
- $\tau_b = 230$ ps
- V_{Ga} : $\tau_v = 260$ ps (hluboká záchytová centra)
- mělká záchytová centra: $\tau_s = 230$ ps
- záchyt pozitronů v Rydbergových stavech



Anihilace pozitronů v polovodičích

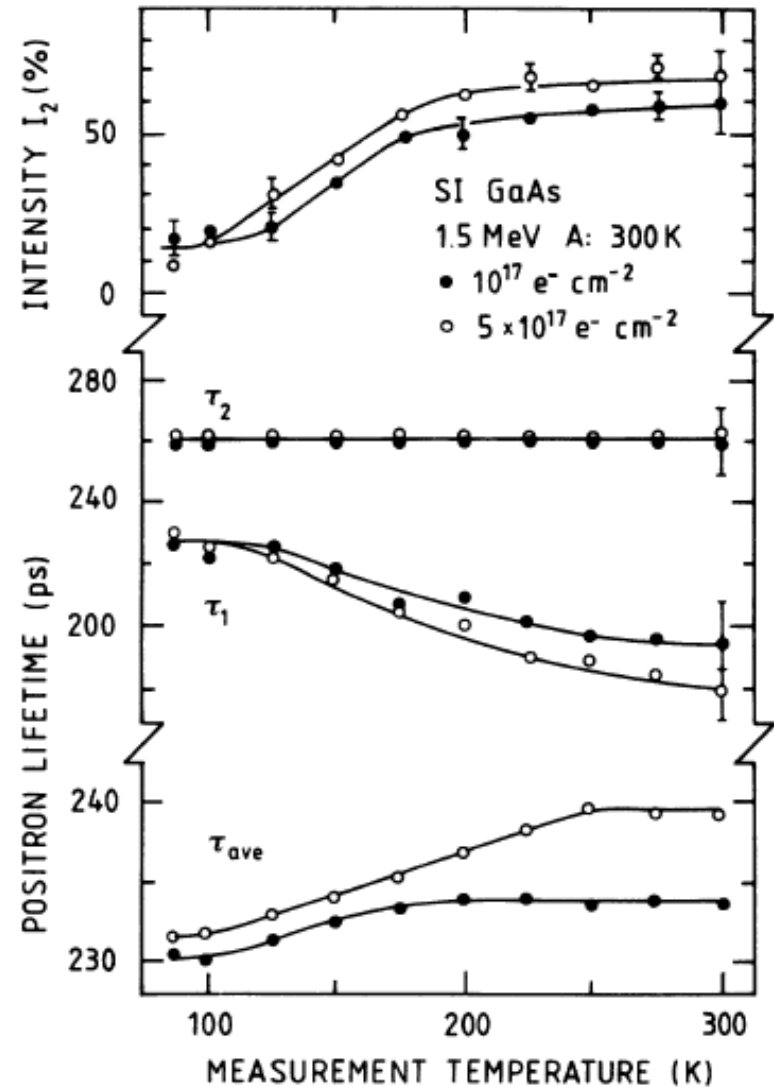
- GaAs ozářený elektrony (1.5 MeV)
- $\tau_b = 230$ ps
- V_{Ga} : $\tau_v = 260$ ps (hluboká záchytová centra)
- mělká záchytová centra: $\tau_s = 230$ ps
- záchyt pozitronů v Rydbergových stavech
- záporně nabitě ionty Ga_{As}
- koncentrace Ga_{As} nezávislá na koncentraci vakancí



Anihilace pozitronů v polovodičích

- **GaAs** ozářený elektrony (1.5 MeV)
- $\tau_b = 230$ ps
- V_{Ga} : $\tau_v = 260$ ps (hluboká záchyťová centra)
- mělká záchyťová centra: $\tau_s = 230$ ps
- záchyť pozitronů v Rydbergových stavech
- záporně nabitě ionty Ga_{As}
- $E_b = (41 \pm 4)$ meV
- koncentrace $c_{st} = 1.3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

rozklad na komponenty



Anihilace pozitronů v polovodičích

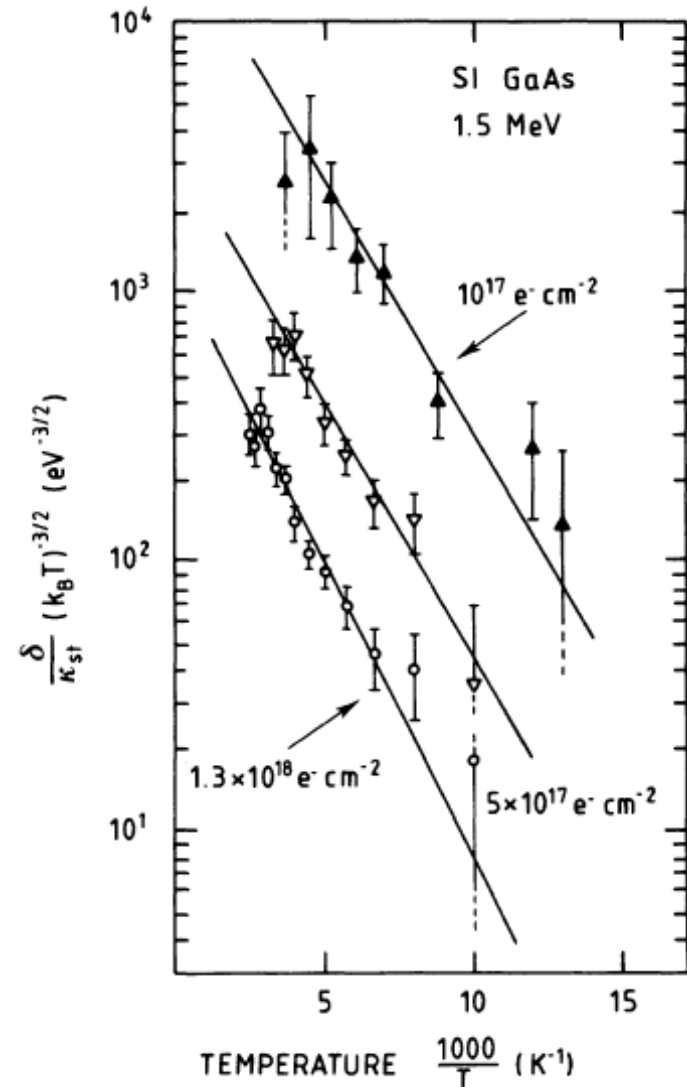
- GaAs ozářený elektrony (1.5 MeV)
- $\tau_b = 230$ ps, záporně nabitě ionty Ga_{As}

$$\frac{\delta_{st}(T)}{K_{st}} = \frac{1}{c_{st}} \left(\frac{mkT}{2\pi\eta^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_B}{kT}\right)$$

$$\frac{\delta_{st}(T)}{K_{st}} (kT)^{-3/2} = \frac{1}{c_{st}} \left(\frac{m}{2\pi\eta^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_B}{kT}\right)$$

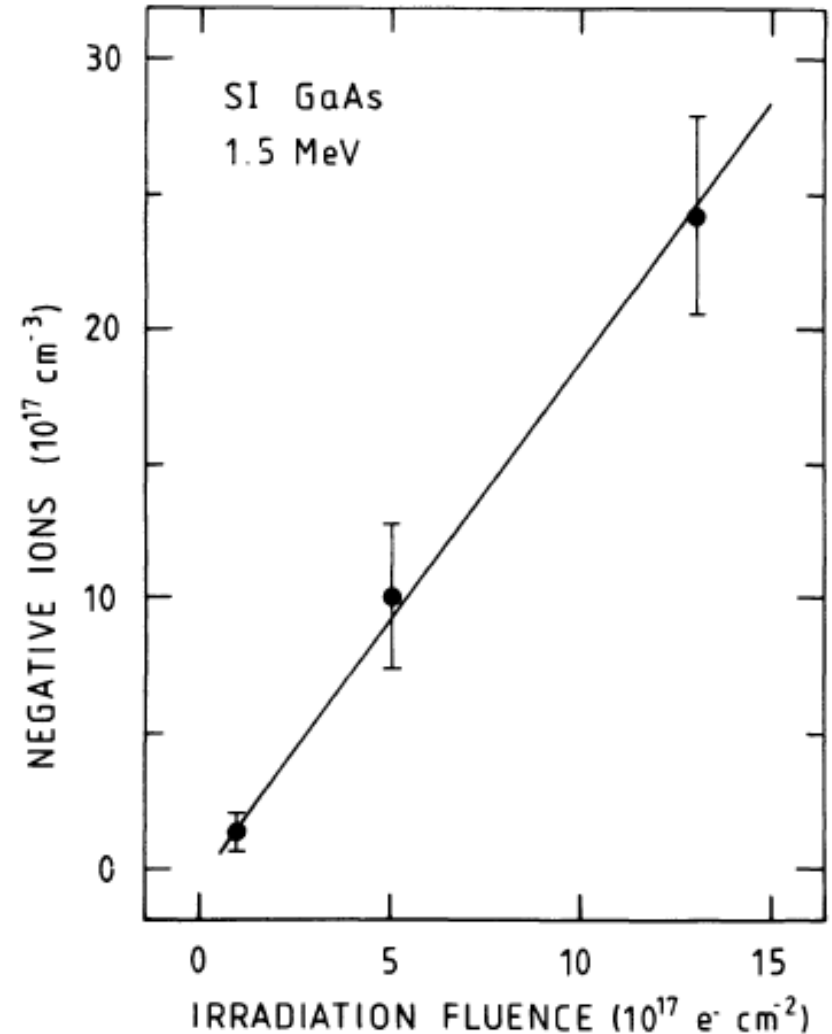
- Arrheniův plot

$$\frac{\delta_{st}(T)}{K_{st}} (kT)^{-3/2} \quad \text{vs} \quad \frac{1}{T}$$



Anihilace pozitronů v polovodičích

- GaAs ozářený elektrony (1.5 MeV)
- $\tau_b = 230$ ps, záporně nabitě ionty Ga_{As}
- koncentrace mělkých záchytových center
- $E_b = 38 - 41$ meV



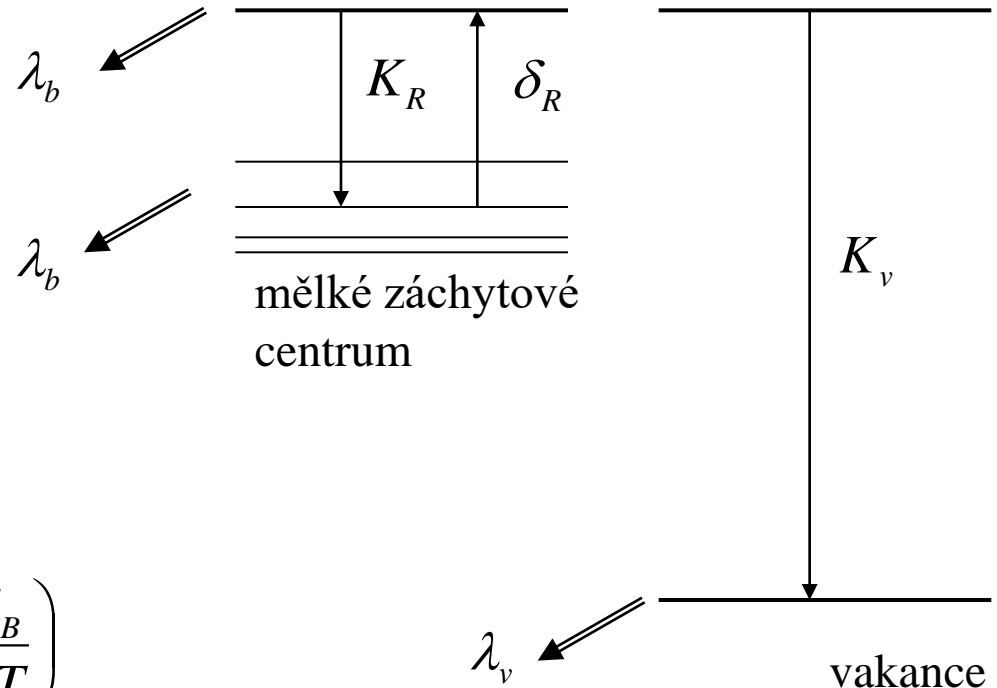
Anihilace pozitronů v polovodičích

- záchytový model

$$\frac{dn_b}{dt} = (-\lambda_b - K_v - K_R)n_b + \delta_R n_R$$

$$\frac{dn_R}{dt} = (-\lambda_b - \delta_R)n_R + K_R n_b$$

$$\frac{dn_v}{dt} = -\lambda_v n_v + K_v n_b$$



$$\frac{\delta_R(T)}{K_R} (kT)^{-3/2} = \frac{1}{c_R} \left(\frac{m}{2\pi\eta^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_B}{kT}\right)$$

Anihilace pozitronů v polovodičích

- záchytný model

$$\frac{dn_b}{dt} = (-\lambda_b - K_v - K_R)n_b + \delta_R n_R$$

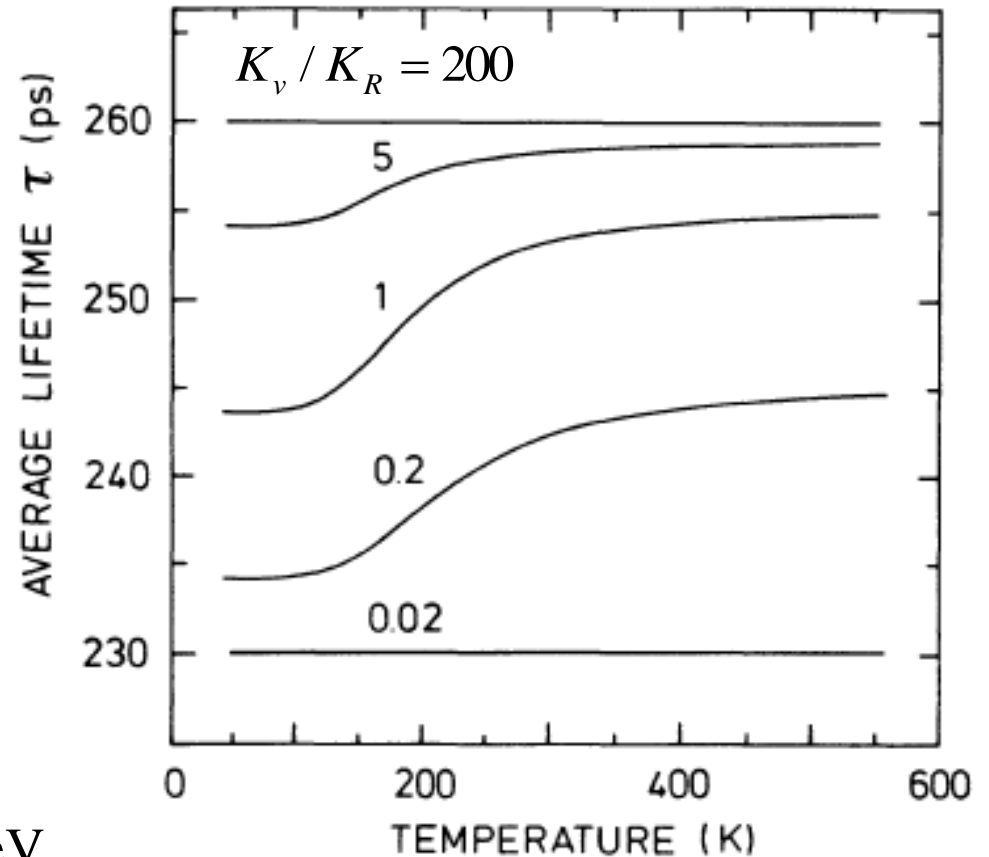
$$\frac{dn_R}{dt} = (-\lambda_b - \delta_R)n_R + K_R n_b$$

$$\frac{dn_v}{dt} = -\lambda_v n_v + K_v n_b$$

$$\frac{\delta_R(T)}{K_R} (kT)^{-3/2} = \frac{1}{c_R} \left(\frac{m}{2\pi\eta^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_B}{kT}\right)$$

$$\lambda_b^{-1} = 230 \text{ ps} \quad \lambda_v^{-1} = 260 \text{ ps} \quad E_b = 50 \text{ meV}$$

- vliv poměru K_v / K_R



Anihilace pozitronů v polovodičích

- záchytný model

$$\frac{dn_b}{dt} = (-\lambda_b - K_v - K_R)n_b + \delta_R n_R$$

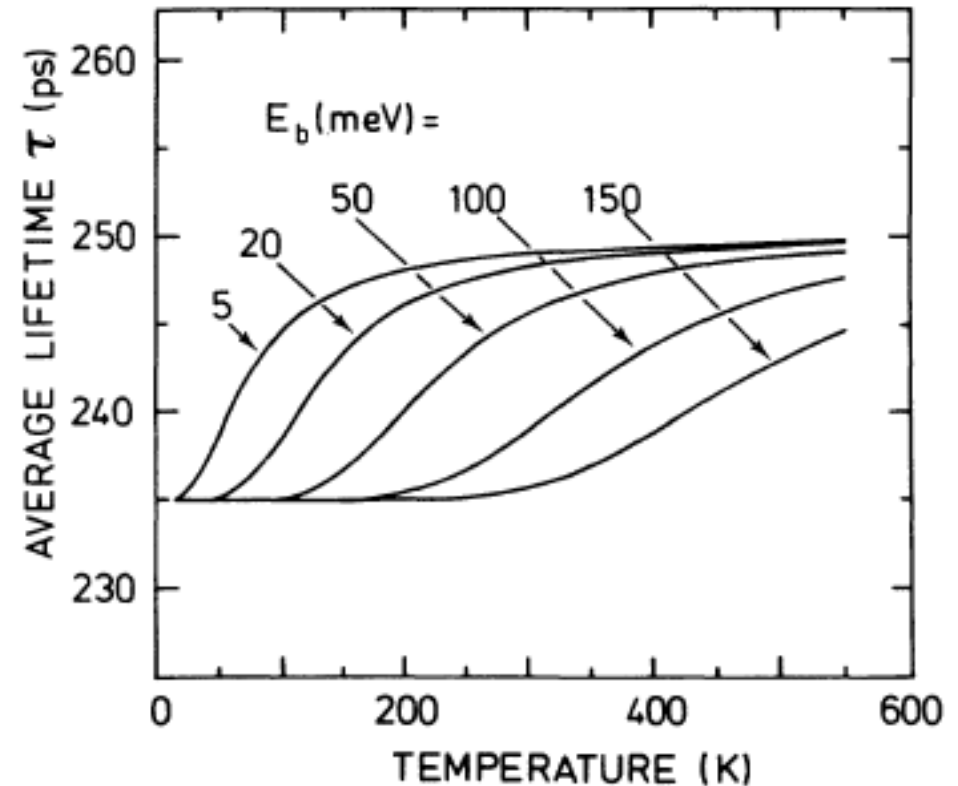
$$\frac{dn_R}{dt} = (-\lambda_b - \delta_R)n_R + K_R n_b$$

$$\frac{dn_v}{dt} = -\lambda_v n_v + K_v n_b$$

$$\frac{\delta_R(T)}{K_R} (kT)^{-3/2} = \frac{1}{c_R} \left(\frac{m}{2\pi\eta^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_B}{kT}\right)$$

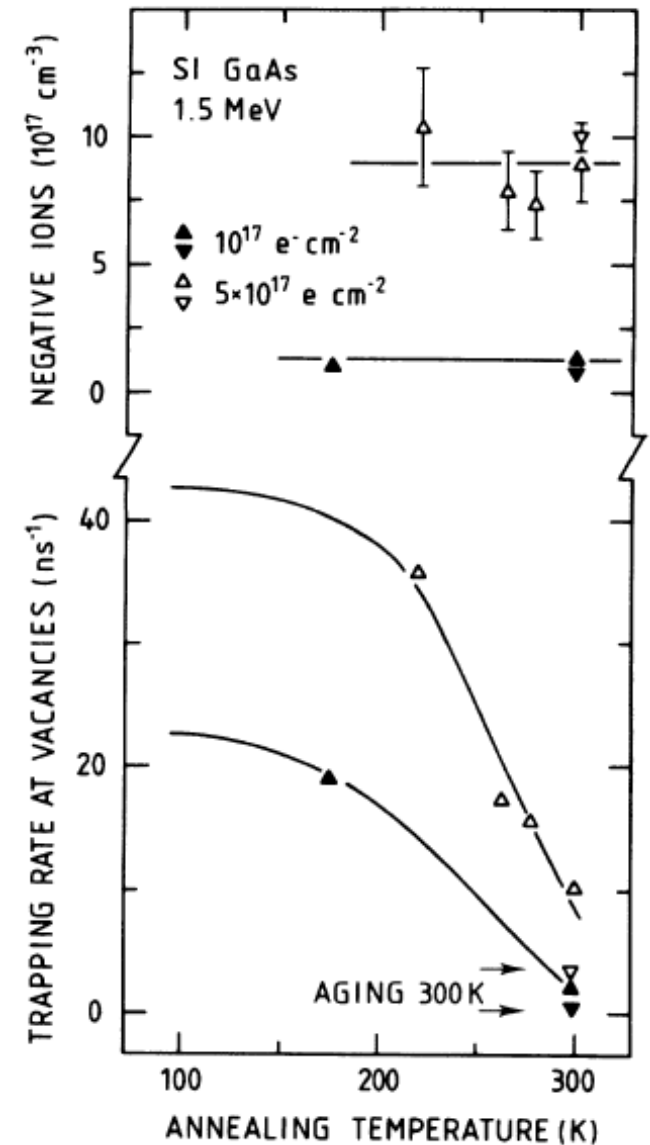
$$\lambda_b^{-1} = 230 \text{ ps} \quad \lambda_v^{-1} = 260 \text{ ps} \quad K_v / K_R = 0.22$$

- vliv vazebné energie pozitronu E_b



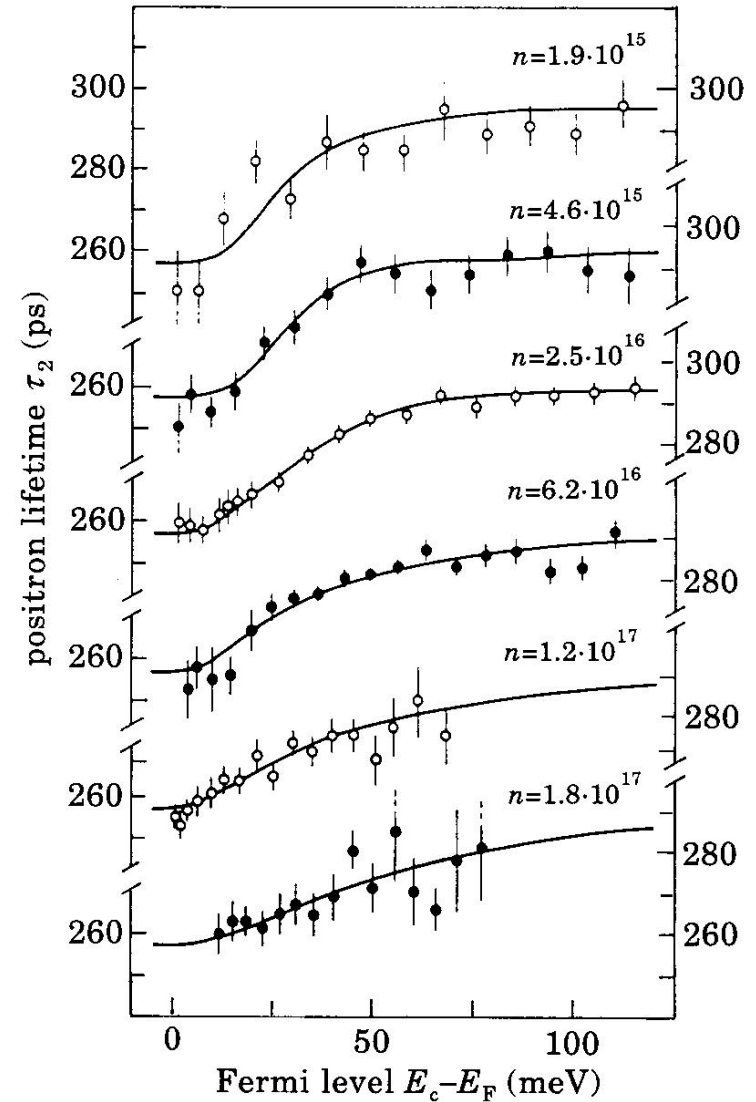
Anihilace pozitronů v polovodičích

- GaAs ozářený elektrony (1.5 MeV)
- teplotní stabilita defektů
- mělká záchyťová centra jsou teplotně stabilní
- vakance se při pokojové teplotě odžihávají



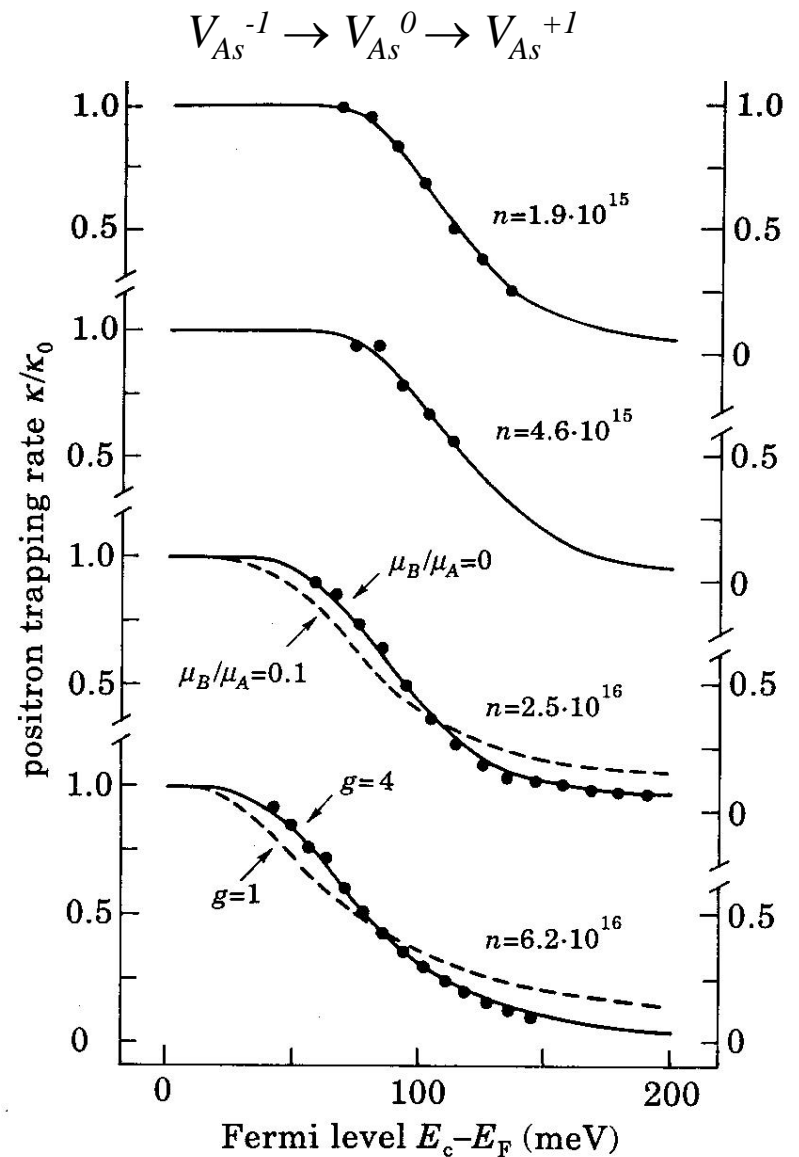
Anihilace pozitronů v polovodičích

- GaAs
- závislost τ_v na poloze Fermiho hladiny
- přechod $\tau_v = 260 \text{ ps} \rightarrow 295 \text{ ps}$
- $\tau_v = 260 \text{ ps}$: V_{As}^{-1}
- $\tau_v = 295 \text{ ps}$: V_{As}^0
- přechod $V_{As}^{-1} \rightarrow V_{As}^0$



Anihilace pozitronů v polovodičích

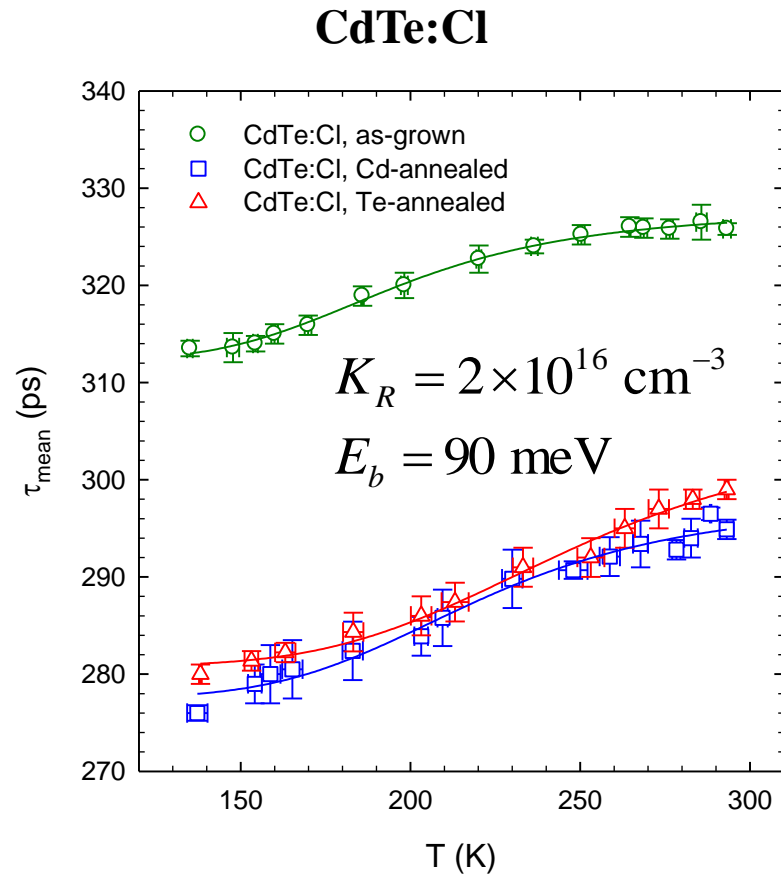
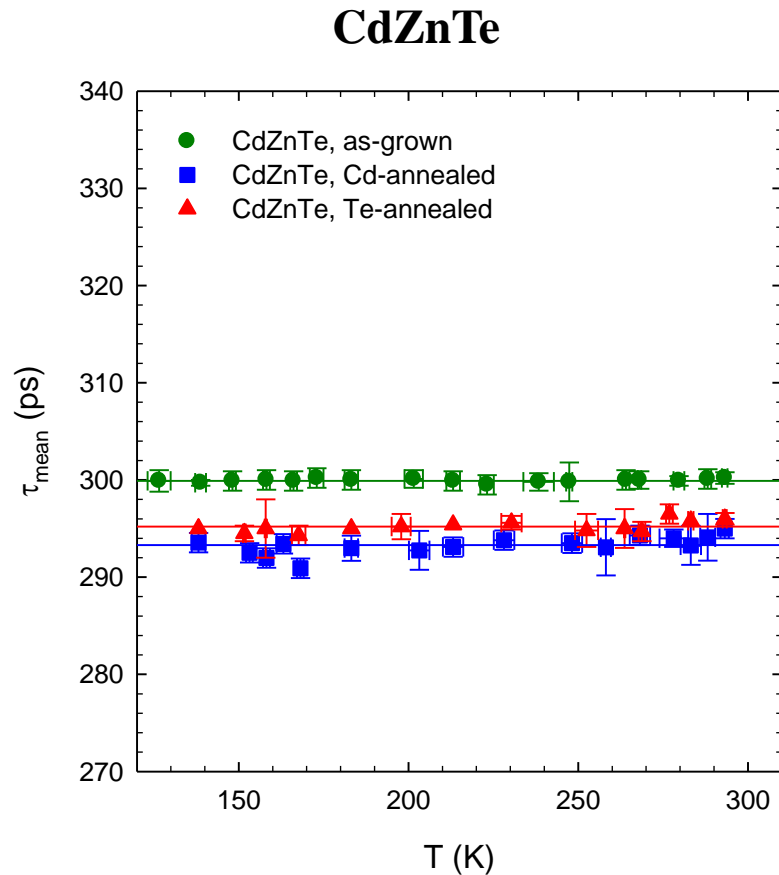
- GaAs
- závislost záhytové rychlosti K_{295} na poloze Fermiho hladiny



Anihilace pozitronů v polovodičích

- **CdTe**
- bulk $\tau_b = 295$ ps
- vakance $(V_{Cd} - 2Zn_{Te})^0$, $\tau_v = 320$ ps

- A-centrum $(V_{Cd} - Cl_{Te})^-$, $\tau_v = 330$ ps
- klastr 4 A-center $4(V_{Cd} - Cl_{Te})^-$, $\tau_{4V} = 420$ ps
- mělká záchytová centra $\tau_R = 290$ ps



Anihilace pozitronů v polovodičích

• CdTe

sample	treatment	T (K)	τ_1 (ps)	I_1 (%)	τ_2 (ps)	I_2 (%)	τ_3 (ps)	I_3 (%)	τ_f
CdTe	as-grown	295	288(2)	90(1)	–	–	379(6)	10(1)	295(2)
CdTe	as-grown	123	286(2)	89(1)	–	–	375(7)	11(1)	294(2)
CdZnTe	as-grown	295	263(9)	42(1)	–	–	327(8)	58(1)	296(5)
CdZnTe	as-grown	123	260(9)	37(4)	–	–	326(8)	63(1)	297(5)
CdZnTe	Cd-annealed	295	295.0(4)	100	–	–	–	–	295.0(4)
CdZnTe	Cd-annealed	123	293.0(5)	100	–	–	–	–	293.0(5)
CdZnTe	Te-annealed	295	260(10)	40(5)	–	–	320(5)	60(10)	290(10)
CdZnTe	Te-annealed	123	253(8)	45(5)	–	–	325(5)	55(8)	288(5)
CdTe:Cl	as-grown	295	230(2)	45(1)	–	–	405(2)	55(1)	301(3)
CdTe:Cl	as-grown	123	145(9)	10(5)	290(10)	55(9)	403(9)	35(8)	291(5)
CdTe:Cl	Cd-annealed	295	294.9(8)	100	–	–	–	–	294.9(8)
CdTe:Cl	Cd-annealed	123	160(9)	11(5)	290(10)	89(5)	–	–	270(10)
CdTe:Cl	Te-annealed	295	240(10)	22(5)	–	–	316(6)	78(5)	295(2)
CdTe:Cl	Te-annealed	123	150(10)	9(4)	290(9)	81(8)	320(10)	10(4)	270(6)