

OPTOELECTRONICS (2)

Lecture 1: Recombination

Mohammad Ali Mansouri-Birjandi

Department of Electrical and Computer Engineering
University of Sistan and Baluchestan (USB)

mansouri@ece.usb.ac.ir

mamansouri@yahoo.com

مراجع

1. Pallab Bhattacharya

Semiconductor Optoelectronic Devices

Prentice Hall, Inc. (2nd ed. 1997)

2. Jacques I. Pankove

Optical Processes In Semiconductors

Dover Publications, Inc. (1971)

فهرست مطالب

0- مقدمه

1- باز ترکیب شاکلی-رد-هال (*Shockley-Read-Hall Recombination*)

یا (تولید و باز ترکیب از طریق نقص ها یا ترازهای درون شکاف انرژی)

(*Recombination-Generation Via Defects or Levels in the Band gap*)

2- باز ترکیب سطحی (*Surface Recombination*)

3- باز ترکیب اوژه (*Auger Recombination*)

مقدمه

باز ترکیب:

۱- تشعشی (Radiative)

۲- غیر تشعشی (NonRadiative)

❖ در بسیاری از نیمه‌هادی‌ها، انتقال **غیر تشعشی** فرآیند **غالب** برای باز ترکیب یک زوج الکترون-حفره است.

❖ مثلاً در ژرمانیوم خالص، احتمال فرآیند باز ترکیب **غیر تشعشی**، هزاران برابر **بیشتر** از فرآیند **تشعشی** است.

مقدمه (۲)

□ درک و بررسی تجربی باز ترکیب غیر تشعشی مشکل است.

وقتی یک فوتون در فرآیند گذار، گسیل می شود.

باز ترکیب
تشفشی

هر فرآیندی که فوتون گسیل نکند، می تواند تصویری از یک مدل احتمالی باز ترکیب غیر تشعشی باشد.

باز ترکیب
غیر تشعشی

□ در باز ترکیب های غیر تشعشی، معمولاً فونون (**phonon**) تولید می شود.

□ پارامترهایی که قابل اندازه گیری می باشند، عبارتند از: راندمان گسیل، طول عمر حامل، فرآیند باز ترکیب در پاسخ به افزایش درجه حرارت یا افزایش غلظت حامل. (اسپکتروسکوپی)

مقدمه (۳)

❖ حاملهای اقلیت بوسیلهٔ **تحریک فوتونی** و یا توسط **بایاس** تولید می‌شوند.

❖ فرآیند تولید **حاملهای اقلیت**: چون چگالی حاملهای اکثریت تحت تأثیر قرار نمی‌گیرند.

❖ حاملهای اقلیت اضافه شده معمولاً بعد از اینکه به اندازهٔ **میانگین طول عمر** باقی ماندند، با حاملهای اکثریت **بازترکیب و نابود** می‌شوند.

❖ در یک نیمه‌هادی نوع **n** ، نرخ تولید و باز ترکیب حفره‌ها (**R**) عبارت است از:

$$R = \frac{1}{\tau_h} (p - p_o)$$

τ_h : طول عمر حفره‌ها،
 p : غلظت حفره‌ها در حالت غیرتعادل
 p_o : غلظت حفره‌ها در حالت تعادل.

۱- باز ترکیب شاگلی-رد-هال (Shockley-Read-Hall)

تولید و باز ترکیب از طریق نقص ها یا ترازهای درون شکاف انرژی

Recombination-Generation Via Defects or Levels in the Band gap

❖ فرآیندهای تشعشعی شامل جذب (absorption) یا گسیل (emission) فوتون با انرژی نزدیک به شکاف انرژی است.

❖ فرآیند تشعشعی: انتقال باند به باند الکترون به سمت پائین، گسیل فوتون ←

❖ فرآیند غیر تشعشعی: تولید فونون ←

❖ احتمال اینکه باز ترکیب غیر تشعشعی از طریق ترازهای انرژی درون شکاف انرژی نیمه هادی صورت پذیرد، بیشتر است.

❖ (a) تسخیر الکترون (b) گسیل الکترون (c) تسخیر حفره (d) گسیل حفره.

در (a) و (b) تله ها الکترونی ($s_e \gg s_h$) و در (c) و (d) تله ها، حفره ای اند ($s_h \gg s_e$)

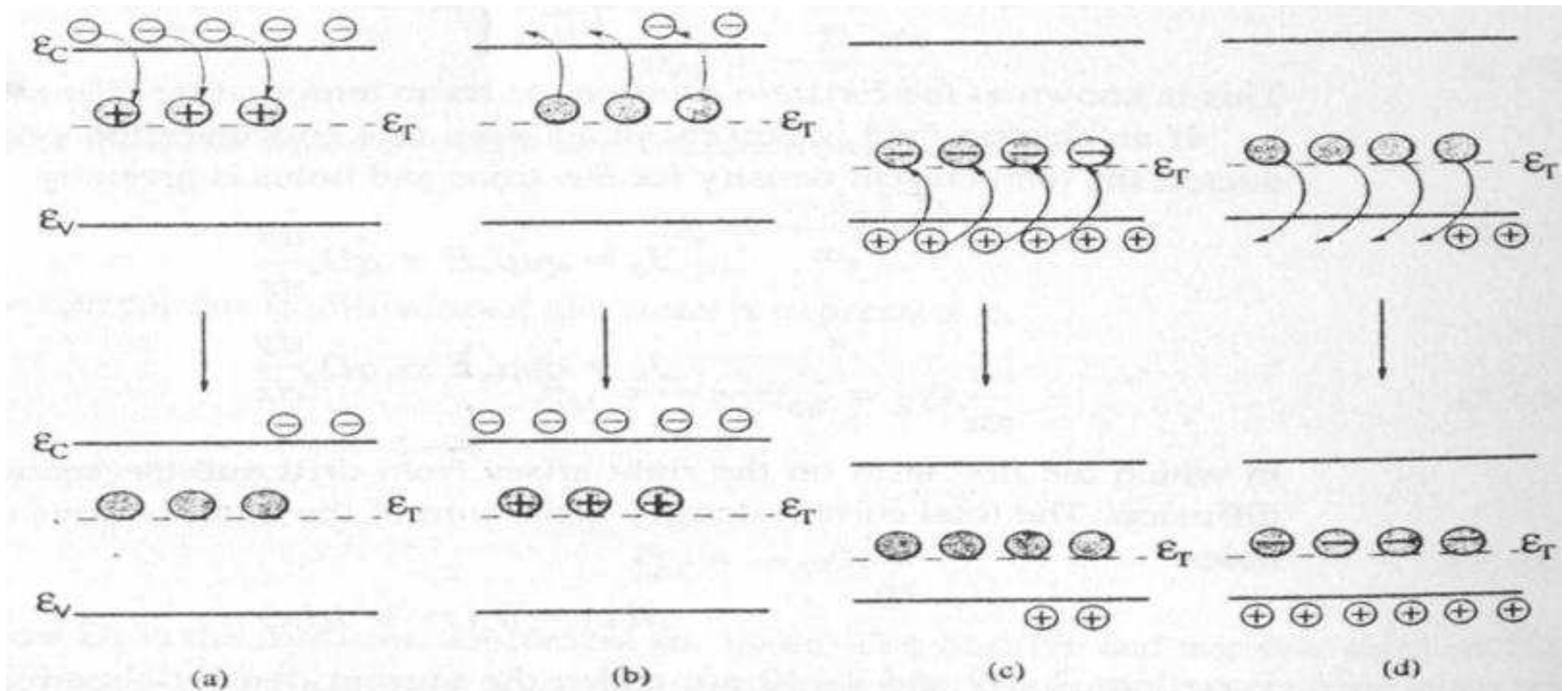


Figure 2.28 Illustration of (a) electron capture, (b) electron emission, (c) hole capture, and (d) hole emission. The deep levels in (a) and (b) are electron traps ($s_e \gg s_h$) and those in (c) and (d) are hole traps ($s_h \gg s_e$).

توضیح ترازهای انرژی عمیق

- ❖ مراکزی که در باند ممنوعه با شکاف انرژی بزرگ قرار دارند، نقش مهمی ایفا می کنند.
- ❖ ترازهای عمیق نقش **مراکز باز ترکیب** یا **تله** را ایفا می کنند و بنابراین به شدت بر کار قطعه اثر می گذارند.

❖ ایجاد ترازهای عمیق به طرق مختلف:

1. ایجاد نقص های جایگزینی (**substitutional**) (بوسیله اتم های ناخالصی)
2. ایجاد نقص های بینابینی (**interstitial**) (بوسیله اتم های ناخالصی)
3. جاهای خالی شبکه (**Lattice Vacancies**)
4. نقص های **مرکب** که با ترکیب دو نوع از نقص های ۱ و ۲ تشکیل می شوند.

نرخ‌های باز ترکیب هر فرآیند (r) (Cm⁻³ S⁻¹)

$$r_a = c_n n N_T (1 - f(\varepsilon)) = v_{th} S_e n N_T (1 - f(\varepsilon))$$

$$r_b = e_n N_T f(\varepsilon)$$

$$r_c = v_{th} S_h p N_T f(\varepsilon)$$

$$r_d = e_p N_T (1 - f(\varepsilon))$$

$C_{n(p)}$ و $e_{n(p)}$ به ترتیب نرخ‌های تسخیر و گسیل حامل در تراز عمیق یا تله، N_T غلظت تله، (cm^{-3}) و n و p غلظت حامل‌های آزاد در باندهای مربوطه، (cm^{-3})

v_{th} سرعت حرارتی حاملها، (cm/s) $f(\varepsilon)$ تابع فرمی در تراز تله

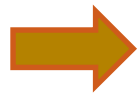
S_e و S_h سطح مقطع برخورد تسخیر الکترون و حفره در تراز تله هستند.

توجه: واحدهای e_n (S^{-1}) و C_n ($\text{Cm}^3 \text{S}^{-1}$) متفاوت هستند.

تحت شرایط تعادل (نرخ تولید $G=0$)

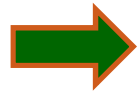
❖ در غیاب تولید حاملها توسط تحریک فوتونی یا دیگر تحریکها:

$$r_a = r_b$$



$$e_n = \vartheta_{th}^e S_e N_c e^{-(\epsilon_c - \epsilon_T) / k_B T}$$

$$r_c = r_d$$



$$e_p = \vartheta_{th}^h S_h N_v e^{-(\epsilon_T - \epsilon_V) / K_B T}$$

❖ اگر فرض شود که حاملها نیز با نرخ G تولید می‌شوند، بنابراین نیمه‌هادی در شرایط **غیرتعادلی** قرار دارد.

❖ در فرآیند **تولید**، زوج-الکترونی از باند ظرفیت به باند هدایت برده شده و یک **حفره باقی** می‌گذارد.

حالت پایدار (steady state)

تحت شرایط **حالت پایدار**: نرخ وارد شدن حاملها به یک باند با نرخ ترک نمودن آنها برابر است. بنابراین، برای یک نیمه‌هادی نوع **n** در این شرایط:

$$\frac{dn}{dt} = G - (r_a - r_b) = 0$$

$$\frac{dp}{dt} = G - (r_c - r_d) = 0$$

$$r_a - r_b = r_c - r_d$$

تحت شرایط غیر تعادلی حالت پایدار:

$$f(\varepsilon_T) = \frac{S_e n + S_h N_V e^{-(\varepsilon_T - \varepsilon_V)/K_B T}}{S_e [n + N_C e^{-(\varepsilon_c - \varepsilon_T)/K_B T}] + S_h [p + N_V e^{-(\varepsilon_T - \varepsilon_V)/K_B T}]}$$

نرخ باز ترکیب از طریق تله‌های تراز عمیق تحت شرایط حالت پایدار

$$R = r_a - r_b = r_c - r_d$$
$$= \frac{S_e S_h \vartheta_{th} N_T [np - n_i^2]}{S_e [n + N_C e^{-(\epsilon_c - \epsilon_v)/K_B T}] + S_h [p + N_V e^{-(\epsilon_T - \epsilon_V)/K_B T}]}$$

❖ سطح مقطع برخورد تسخیر (**Capture Cross Section**) معیاری برای تعیین مقدار نزدیک شدن یک حامل به مرکز تله در فرآیند **تسخیر شدن** است.

❖ معمولاً برای یک **تله الکترونی** $S_e \gg S_h$ و برای یک **تله حفره** $S_h \gg S_e$ است.

❖ برای تله‌های معمولی $S_{e(h)} \sim 10^{-15} - 10^{-13} \text{ Cm}^2$ می‌باشد.

وقتی تله‌ها رفتاری شبیه مراکز باز ترکیب غیرتشنشی داشته باشند:

$$S_e = S_h = S_r$$

بنابراین، برای بازترکیب غیرتشنشی از طریق مراکز باز ترکیب:

$$R = S_r \vartheta_{th} N_T \frac{np - n_i^2}{n + p + 2n_i \cosh\left(\frac{\epsilon_T - \epsilon_{Fi}}{K_B T}\right)}$$

$$N_C e^{-(\epsilon_C - \epsilon_T)/K_B T} = n_i e^{-(\epsilon_{Fi} - \epsilon_T)/K_B T}$$

$$N_V e^{-(\epsilon_T - \epsilon_V)/K_B T} = n_i e^{-(\epsilon_T - \epsilon_{Fi})/K_B T}$$

نرخ باز ترکیب شاکی-رد-هال، برای شرایط تزریق کم (Low-Level injection).

برای یک نیمه‌هادی نوع n با تزریق کم: $n \gg p$
 و $n \gg n_i \exp [(\epsilon_T - \epsilon_{Fi}) / K_B T]$
 با این تقریب خواهیم داشت:

$$R = \frac{S_h \vartheta_{th} N_T (np - n_i^2)}{n}$$

$n_0 p_0 = n_i^2$ و p_0 مقادیر حالت تعادل اند، و با فرض $n \approx n_0$:

$$R = S_h \vartheta_{th} N_T [p - p_0] = \frac{1}{\tau_h} (p - p_0)$$

$$\tau_h = (S_h \vartheta_{th} N_T)^{-1}$$

❖ طول عمر حاملها، تابع چگالی حاملهای اکثریت (یعنی n) نیست. عامل محدود کننده نرخ در فرآیند باز ترکیب، غلظت حاملهای اقلیت است.

۲- باز ترکیب سطحی (Surface Recombination)

❖ همهٔ خواص بدنهٔ یک نیمه‌هادی به **سطح متوقف** می‌شوند.

❖ سطح مربوط، شامل باندهای معلق (**dangling band**) و یا باندهایی که بوسیلهٔ **اتمهای دیگری** غیر از اتمهای میزبان در بدنه تکمیل می‌شوند، خواهد بود.

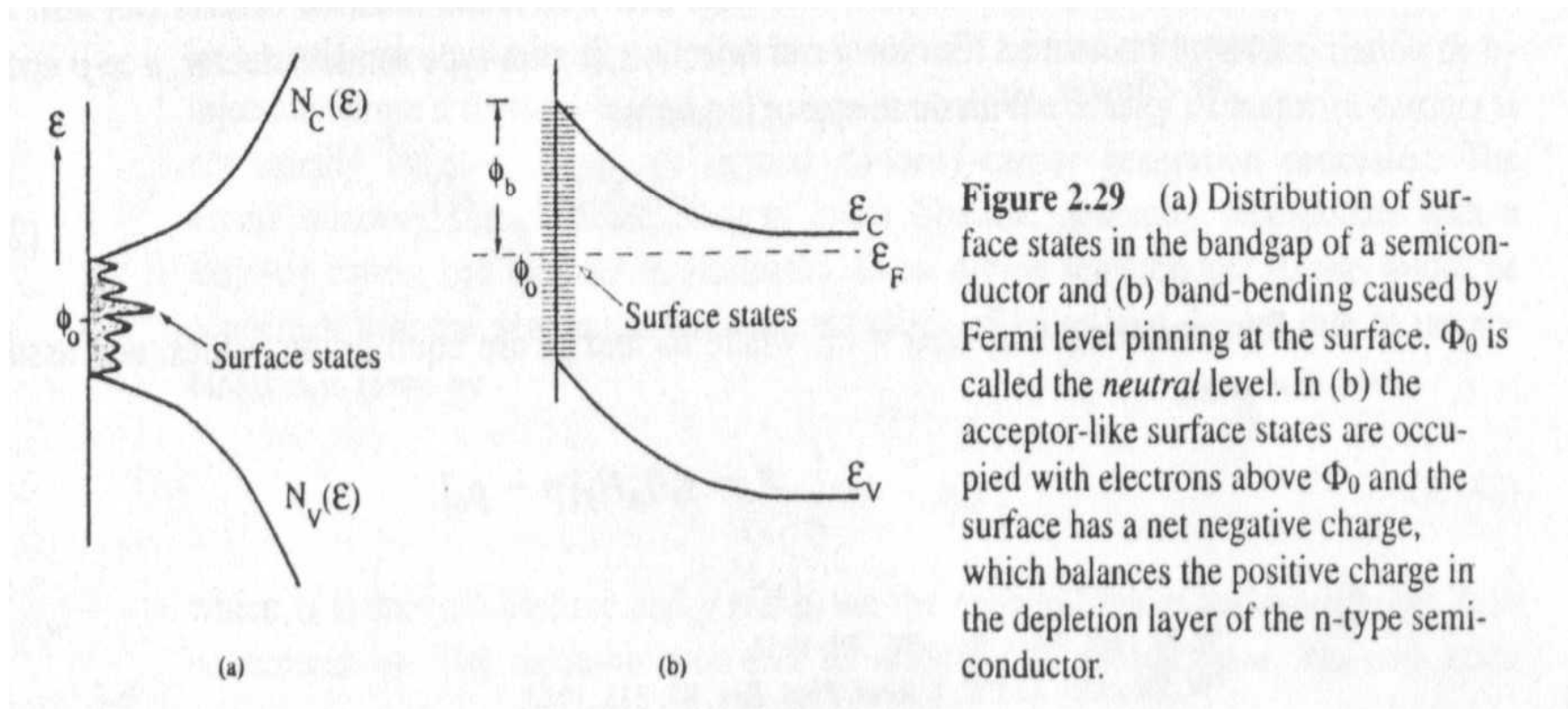
❖ یکی از عناصر متداول **اکسیژن** است، بنابراین یک **اکسید محلی** به سرعت در سطح نیمه‌هادی تشکیل می‌شود.

❖ باندهای **معلق** و باندهای ایجادشده با **اتمهای غیرخودی** باعث بوجود آمدن چگالی بالایی از نقص‌ها در سطح نیمه‌هادی می‌شوند.

❖ توزیعی از حالت‌های نقص‌های سطحی در شکاف انرژی

❖ تراز فرمی به جای اینکه بوسیلهٔ خنثی بودن بار در بدنه تنظیم شود، بوسیلهٔ حالت کلی بار سطحی تنظیم می‌شود.

❖ بدلیل حجم زیاد حالت‌های سطحی، بازترکیب زیادی در سطح نیمه‌هادی بوجود می‌آید.



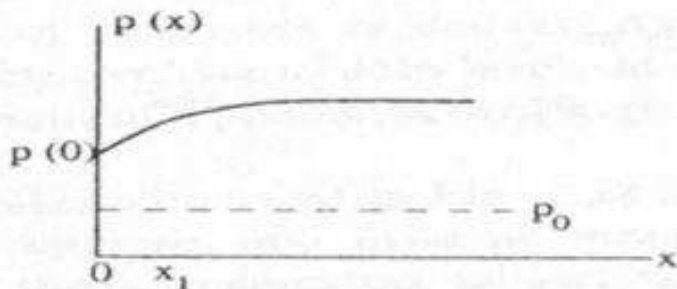
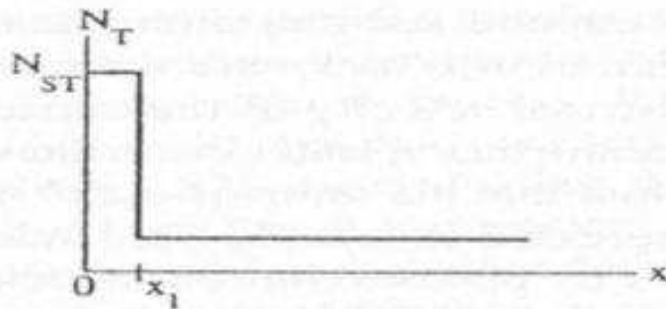
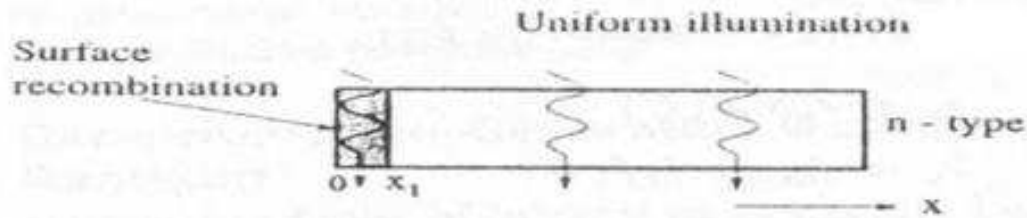


Figure 2.30 Enhanced surface recombination and resulting distribution of excess minority carriers in the presence of surface states.

❖ چگالی حالت سطح N_{ST} معمولاً بوسیله تابع دلتا در سطح مشخص می‌شود.

❖ هنگامیکه نور به چنین سطحی بتابد، اکثر آن قبل از رسیدن به بدنه، در محدوده سطح بازترکیب می‌شود.

❖ بدلیل چگالی زیاد مراکز ترکیب در سطح، توزیع حاملهای اقلیت اضافی در نیمه‌هادی، مطابق شکل خواهد بود.

محاسبه نرخ باز ترکیب سطحی R_s :

فرض: - ماده مورد نظر نوع n باشد و حفره‌ها، حامل‌های اقلیت را تشکیل می‌دهند.
- چگالی حالت‌های سطحی N_{ST} تا ضخامت X_i به درون ماده ادامه می‌یابد.

$$R_s = S_h \vartheta_{th} N_{ST} X_i [p(0) - p_0] = S_R [P(0) - P_0]$$

در شرایط پایدار، R_s باید مساوی شار حامل‌های اقلیت به درون ناحیه سطح باشد. بنابراین:

$$D_h \left. \frac{\partial p}{\partial x} \right|_{x=0} = S_R [P(0) - P_0]$$

S_R : سرعت باز ترکیب سطحی است. این عبارت، معیاری از نرخ چگالی باز ترکیب سطحی و یا چگالی نقص‌های مربوطه می‌باشد.

❖ کاهش باز ترکیب سطحی:

۱- ایجاد غیرفعال سازی سطح بوسیله یک دی الکتریک،

(مانند دی اکسید سیلیکون یا نیتراید سیلیکون)

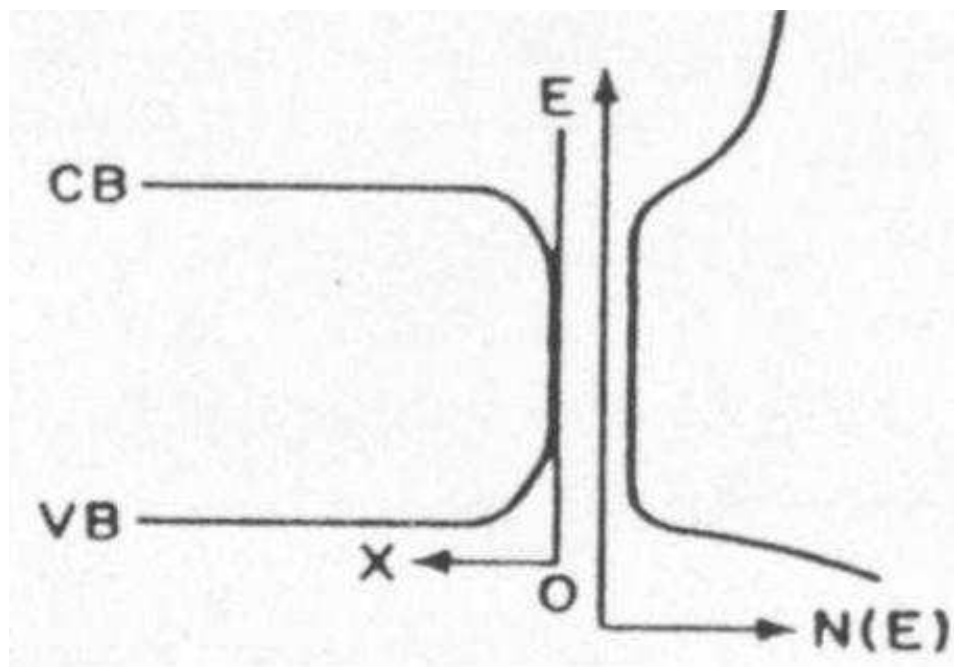
۲- بوسیله یک پیوند نامتجانس در سطح آزاد.

در هر دو مورد، ماده با شکاف انرژی بزرگتر بالای سطح آزاد، نه تنها باز ترکیب سطحی را کاهش می دهد، بلکه بعنوان یک پنجره برای قطعاتی مانند آشکار ساز یا سلول خورشیدی عمل می کند، و از طریق آن ، نور لازم برای لایه فعال مورد نظر جذب می شود.

□ نتیجه گیری: باز ترکیب های غیر تشعشعی بدنه ای و سطحی برای عملکرد قطعات الکترونیک نوری به شدت زیان آورند.

□ این مراکز، که بعضی اوقات «مراکز کُشنده» (Killer Centers) نیز نامیده می شوند، با ایجاد یک مسیر انحرافی غیر تشعشعی باعث از بین رفتن حامل های اضافی می شوند.

باز ترکیب سطحی از نگاه کتاب Pankove:



مدل توزیع پیوسته از حالت‌های سطح

- ❖ یک سطح، اختلال قوی از یک شبکه است و دارای باندهای معلقه است که میتواند ناخالصیها را از محیط جذب کند.
- ❖ بنابراین می‌تواند غلظت زیادی از سطوح عمیق و کم عمیق را ایجاد کند.
- ❖ این سطوح می‌تواند بعنوان مراکز باز ترکیب عمل نمایند.

۳- بازترکیب اوژه (Auger Recombination)

❖ فرآیند اوژه یک فرآیند بازترکیب غیرتشنعی سه حاملی است.

❖ در این فرآیند، انرژی اضافی آزاد شده توسط بازترکیب یک جفت الکترون و حفره در برخورد کولمبی، تبدیل به انرژی جنبشی حامل سوم می شود که از لحاظ انرژی به عمق باند مربوطه صعود می کند. نتیجتاً حامل گرم شده و به تله باند برمی گردد.

□ نرخ بازترکیب کلی وابسته به تجمع حاملها که به گسیل خودبخودی می انجامد را می توان به صورت زیر بیان نمود،

$$R(n) = An + Bn^2 + Cn^3$$

❖ اولین جمله، برای "بازترکیب شاکی-رد-هال" در نقصها و تلههاست. و $A = S V_{th} N_T$ است.

❖ جمله دوم جهت "بازترکیب تشنعی خودبخودی" منظور می شود،

❖ جمله سوم برای "بازترکیب اوژه" است که نقش مهمی در عملکرد لیزرهای پیوندی بازی میکند.

فرایندهای باز ترکیب اوژه باند به باند مختلف ممکن، در یک نیمه هادی مستقیم

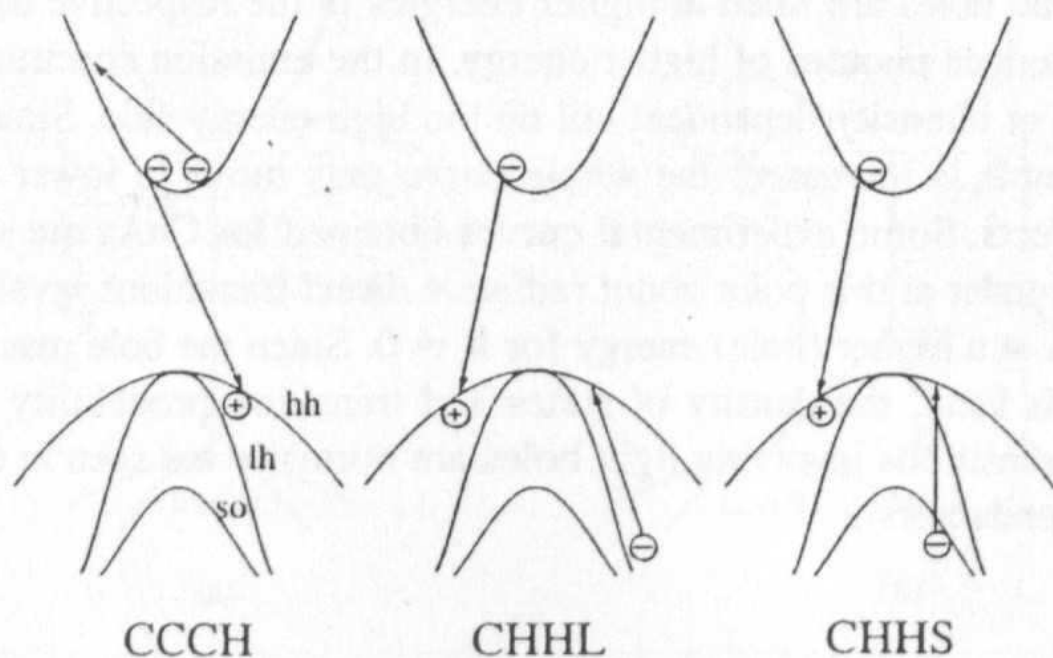


Figure 3.23 Different possible band-to-band Auger recombination processes in a direct bandgap semiconductor. Similar Auger transitions are also possible for impurity-band or D-A recombinations.

❖ در اینجا **C**، **H**، **L** و **S** نماینده باندهای هدایت، حفره سنگین، حفره سبک و باند جدا شده (split-off) می باشند.

❖ مثلاً **CCCH** نشان دهنده فرآیند هدایت-هدایت-حفره سنگین است، که در مواد نوع n عمومیت دارد.

$$\tau_{\text{Auger}} = n / R_{\text{Auger}} = (Cn^2)^{-1}$$

طول عمر حامل برای فرآیند اوژه:

❖ ضریب باز ترکیب اوژه C ، مبین خاصیت اساسی نیمه‌هادی است و **حد پایین نرخ‌های باز ترکیب غیر تشعشعی** را معین می‌کند.

❖ باز ترکیب اوژه، مؤثرترین فرآیند در باز ترکیب‌های بدنه و در چگالی بالای حاملها است.
❖ انرژی گرفته شده توسط سومین ذره در باز ترکیب اوژه در مرتبه شکاف باند انرژی بوده، بنابراین یک مومنتم بزرگ از مرتبه $(2mE_g)^{1/2}$ دارد.

❖ **راندمان باز ترکیب اوژه** به تمرکز حامل‌های اضافی بستگی دارد و متناسب با $\exp(-\epsilon_g / K_B T) (K_B T / \epsilon_g)^{1/2}$ می‌باشد.

باز ترکیب اوژه در کتاب :pankove

❖ در اثر اوژه، انرژی آزاد شده، ناشی از باز ترکیب الکترون، فوراً بوسیله الکترون دیگری جذب می شود، که این انرژی بوسیله **انتشار فونون ها** تلف می شود.

❖ بنابراین «**برخورد سه حاملی**» بصورت درگیری دو الکترون و یک حفره است. در نتیجه هیچ فوتون خالصی، گسیل نمی شود.

