

دانشگاه سیستان و بلوچستان

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

گروه الکترونیک

باز ترکیب غیر تشعشعی

(NonRadiative Recombination)

تهیه کننده : محمد علی منصورى بیرجندى

فهرست مطالب

۱- مقدمه

۲- 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)

۳- باز ترکیب سطحی (Surface Recombination)

۴- باز ترکیب اوژه (Auger Recombination)

مراجع



مقدمه

یک زوج الکترون - حفره می‌توانند بصورت غیرتشعشی بازترکیب شوند. در حقیقت در بسیاری از نیمه‌هادی‌ها، انتقال غیرتشعشی فرآیند غالب می‌باشد. لذا در ژرمانیوم خالص، احتمال گذرا تشعشی که از رابطه **Roosbroeck-shockley** محاسبه می‌شود، با طول عمر تشعشی که در حدود یک ثانیه می‌باشد، امکان‌پذیر نمی‌باشد. زیرا طول عمر حامل‌های اقلت، کمتر از میلی ثانیه است و حتی کمتر از میکروثانیه، اندازه‌گیری شده است. بنابراین احتمال فرآیند بازترکیب غیرتشعشی در ژرمانیوم هزاران برابر بیشتر از فرآیند تشعشی می‌باشد.

درک بازترکیب غیرتشعشی مقداری مشکل است. حالت «بازترکیب تشعشی» را می‌توان بصورت صریحی تعریف کرد و آن عبارت است از اینکه: "وقتی یک فوتون در فرآیند گذار گسیل می‌شود." در حالیکه «بازترکیب غیرتشعشی» واضح نمی‌باشد و بصورت مبهمی می‌توان بصورت زیر بیان کرد که: "هر فرآیندی که فوتون گسیل نکند، می‌تواند تصویری از یک مدل احتمالی بازترکیب غیرتشعشی باشد." بررسی تجربی فرآیند غیرتشعشی نیز بسیار مشکل می‌باشد، زیرا مکانیزم آشکارسازی این فرآیند، فقط در غیاب تولید مورد نظر، امکان‌پذیر است. پارامترهایی که قابل اندازه‌گیری می‌باشند

فقط عبارتند از: راندمان گسیل، طول عمر حامل، سینتیک فرآیند بازترکیب در پاسخ به افزایش درجه حرارت یا افزایش غلظت حامل.

در این بخش، چندین فرآیند بازترکیب که به گسیل فوتون منجر نمی‌شود، را بررسی می‌کنیم:

- باز ترکیب سطحی و بدنه‌ای (Bulk and Surface Recombination) شامل:

- "بازترکیب شاکلی-رد-هال" (Shockley-Read-Hall) یا (تولید و باز ترکیب از

طریق نقص ها یا ترازهای درون شکاف انرژی)

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

- و باز ترکیب سطحی (Surface Recombination) و مهمترین باز ترکیب یعنی :

- بازترکیب اوژه (Auger Recombination).

اگرچه اثر اوژه ممکن است بعضی از اوقات برای تشریح فرآیندی که بصورت مطلوب می‌تواند نقش بازی کند، ظاهر می‌شود ولی این مورد یک حالت خاص می‌باشد. بنابراین هنوز حوزه بازترکیب غیرتشنشعی، برای تحقیق و بررسی آیندگان باز است.

در یک نیمه‌هادی، حاملهای اقلیت بوسیله تحریک فوتونی ذاتی (intrinsic) و یا توسط تزریق مستقیم پیوند p-n تولید می‌شوند. از آنجایی که معمولاً چگالی حاملهای اکثریت تحت تأثیر قرار نمی‌گیرند، به اینها لقب «فرآیندهای تولید حاملهای اقلیت» داده شده است. حاملهای اقلیت اضافه شده (excess)، معمولاً بعد از اینکه به اندازه میانگین طول عمر باقی ماندند، با حاملهای اکثریت باز ترکیب و نابود می‌شوند. در یک نیمه‌هادی نوع n، تولید و باز ترکیب حفره‌ها مورد توجه است، و نرخ خالص بازترکیب عبارت است از:

$$R = \frac{1}{\tau_h} (p - p_o) \quad (۱۴۲-۲)$$

بطوریکه، τ_h طول عمر حرفه و \mathbf{P} و \mathbf{P}_0 به ترتیب غلظت حرفه‌ها در حالت غیر تعادل و تعادل می‌باشند. باز ترکیب می‌تواند تشعشعی (**radiative**) یا غیر تشعشعی (**non radiative**) باشد. فرآیندهای تشعشعی که در آن فوتون (**photon**) گسیل می‌شود. در این بخش ما به بحث باز ترکیب‌های غیر تشعشعی، که معمولاً یک فونون (**phonon**) تولید می‌شود، خواهیم پرداخت.

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

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

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

فرآیندهای تشعشی مورد نظر ما معمولاً شامل جذب (**absorption**) یا گسیل (**emission**) فوتون با انرژی نزدیک به شکاف انرژی است. یک نمونه آن انتقال باند به باند الکترون به سمت پائین است، که در آن یک فوتون گسیل می شود. یک احتمال کوچک وجود دارد که این انتقال، تولید فوتون نماید، که در چنین حالتی، فرآیند مزبور یک فرآیند غیر تشعشی خواهد بود. هرچند، این احتمال که باز ترکیب غیر تشعشی مزبور از طریق ترازهای انرژی درون شکاف انرژی نیمه هادی صورت پذیرد، بیشتر است، همانطوریکه در شکل ۲-۲۸ نشان داده شده است. در ارزیابی کیفیت یک نیمه هادی در کاربردهای قطعه، مشاهده شده است، مراکزی که در ترازهای انرژی عمیق در باند ممنوعه نیمه هادی 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. ترازهای عمیق را می توان به طرق مختلف از جمله ایجاد نقص های جایگزینی (**substitutional**) و بینابینی (**interstitial**)

بوسیله اتم‌های ناخالصی، جاهای خالی شبکه (Lattice Vacancies) یا نقص‌های مرکب که با ترکیب دو نوع از نقص‌های مذکور تشکیل می‌شوند، ایجاد کرد، نمونه‌های زیادی از ناخالصی جایگزین شده، ایجاد ترازهای عمیق در نیمه‌هادی می‌نماید. توجه کنید که احتمال اینکه چنین انتقالی شامل فوتون شود بسیار زیاد است، و این امر آنرا به غیر تشعشعی تبدیل می‌کند.

فرآیندهایی که در شکل ۲-۲۸ تشریح شده‌اند، عبارتند از:

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

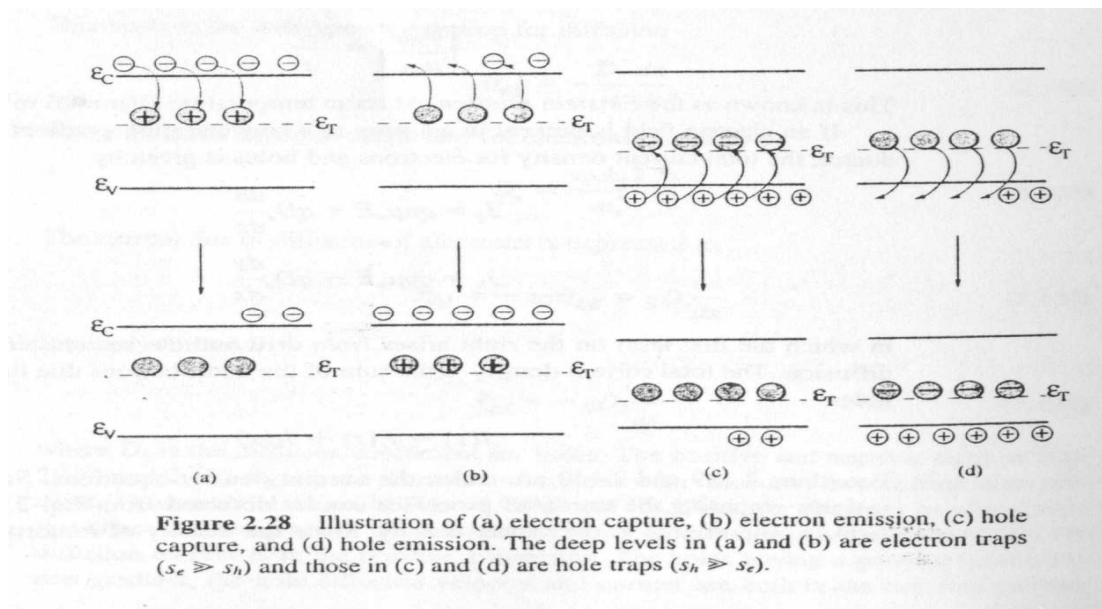


Figure 2.28 Illustration of (a) electron capture, (b) electron emission, (c) hole capture, and (d) hole emission. The deep levels in (a) and (b) are electron traps ($s_e \gg s_h$) and those in (c) and (d) are hole traps ($s_h \gg s_e$).

شکل (۲-۲۸): تشریح (a) تسخیر الکترون (b) گسیل الکترون (c) تسخیر حفره (d) گسیل حفره. ترازهای عمیق در (a) و (b) تله‌های الکترونی هستند ($s_e \gg s_h$) و ترازهای عمیق در (c) و (d) تله‌های حفره‌ای می‌باشند ($s_h \gg s_e$).

اگر r با اندیس مربوط به هر فرآیند، بیان‌کننده نرخ‌های مربوطه باشند، می‌توان آنها را چنین بیان نمود:

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

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

$$r_c = \vartheta_{th} S_h N_T f(\varepsilon) = e_p N_T (1 - f(\varepsilon))$$

(۱۴۳-۲)

در اینجا $C_{n(p)}$ و $e_{n(p)}$ به ترتیب نرخ‌های تسخیر و گسیل حامل در تراز عمیق یا تله، N_T غلظت تله، n و p غلظت حامل‌های آزاد در باندهای مربوطه، ϑ_{th} سرعت حرارتی حاملها، و $f(\varepsilon)$ تابع فرمی در تراز تله می‌باشند. پارامترهای S_e و S_h سطح مقطع برخورد تسخیر الکترون و حفره در تراز تله هستند. توجه کنید که واحدهای e_n (S^{-1}) و C_n ($Cm^3 S^{-1}$) متفاوت هستند. نرخ‌های مختلف r بر حسب ($Cm^3 S^{-1}$) می‌باشند. تحت شرایط تعادل، و در غیاب تولید حاملها توسط تحریک فوتونی یا دیگر تحریک‌ها (نرخ تولید $G=0$)،

$$r_a = r_b \quad (۱۴۴-۲)$$

و با جایگذاری از معادله (2-143) خواهیم داشت:

$$e_n = \vartheta_{th}^e S_e N_c e^{-(\varepsilon_c - \varepsilon_T) / k_B T} \quad (۱۴۵-۲)$$

بطور مشابه

$$r_c = r_d \quad (۱۴۶-۲)$$

که به رابطه زیر خواهیم رسید:

$$e_p = \vartheta_{th}^h S_h N_v e^{-(\varepsilon_T - \varepsilon_V) / K_B T} \quad (۱۴۷-۲)$$

در معادلات (۲-۱۴۵) و (۲-۱۴۷) عبارات \mathcal{E}_T بیان کننده موقعیت انرژی تراز تله می باشد. اگر فرض شود که حاملها نیز با نرخ G تولید می شوند، بنابراین نیمه هادی در شرایط غیر تعادلی قرار دارد. در فرآیند تولید زوج، الکترونی از باند ظرفیت به باند هدایت برده شده و یک حفره باقی می گذارد. همچنین شرایط حالت پایدار (**steady state**) که در آن نرخ وارد شدن حاملها به یک باند با نرخ ترک نمودن آنها برابر است، رادر نظر می گیریم. بنابراین، برای یک نیمه هادی نوع n .

$$\frac{dn}{dt} = G - (r_a - r_b) = 0 \quad (۲-۱۴۸)$$

و

$$\frac{dp}{dt} = G - (r_c - r_d) = 0 \quad (۲-۱۴۹)$$

تحت شرایط غیر تعادلی حالت پایدار،

$$r_a - r_b = r_c - r_d \quad (۲-۱۵۰)$$

لازم است که تابع توزیع $f(\mathcal{E})$ را تحت چنین شایطی غیر تعادلی که n و p تابع نرخ تولید G و متعاقباً $f(\mathcal{E})$ نیز تابع G می باشد، تعیین کنیم. با جایگذاری معادلات ۲-۱۴۳ و ۲-۱۴۵ و ۲-۱۴۷ در معادله ۲-۱۵۰ و ساده سازی آن رابطه زیر بدست می آید:

$$(۲-۱۵۱)$$

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

این عبارت برای $f(\varepsilon_T)$ را می‌توان در عبارت‌های نرخ‌های هر یک از r_a ، r_b ، r_c و r_d جایگزین نمود. بنابراین نرخ خالص باز ترکیب از طریق تله‌های تراز عمیق تحت شرایط غیر تعادلی حالت پایدار بصورت زیر خواهد شد:

$$R = r_a - r_b = r_c - r_d \quad (152-2)$$

$$= \frac{S_e S_h \vartheta_{th} N_T [np - n_i^2]}{S_e [n + N_C e^{-(\varepsilon_c - \varepsilon_V)/K_B T}] + S_h [p + N_V e^{-(\varepsilon_T - \varepsilon_V)/K_B T}]}$$

«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 $S_h \gg S_e$ می‌باشد. برای تله‌های معمولی $10^{-15} - 10^{-13} \text{ Cm}^2$ می‌باشد. هرچند وقتی تله‌ها رفتاری شبیه مراکز باز ترکیب غیر تشعشی داشته باشند،

$$S_e = S_h = S_r \quad (153-2)$$

بنابراین. برای باز ترکیب غیر تشعشی از طریق مراکز باز ترکیب،

$$R = S_r \vartheta_{th} N_T \frac{np - n_i^2}{n + p + 2n_i \cosh\left(\frac{\varepsilon_T - \varepsilon_{Fi}}{K_B T}\right)} \quad (154-2)$$

که ε_{Fi} تراز ذاتی (intrinsic level) بوده و

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

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

(۱۵۵-۲)

معادلات (۲-۱۵۲) و (۲-۱۵۴) بیانگر تئوری «بازترکیب شاکلی-رد-هال» (Shockley-Read-Hall) می‌باشند. نکات مهمی را در معادله (۲-۱۵۴) می‌توان بیان نمود. کمیت $(np - n_i^2)$ معیاری برای سنجش انحراف از شرایط تعادل می‌باشد. این انحراف از حالت تعادل است که بعنوان منبع بازترکیب حامل عمل می‌کند. برای بدست آوردن معادله (۲-۱۵۴) فرض شده است که نقص‌ها بعنوان مراکز بازترکیب حقیقی که معمولاً وسط شکاف انرژی که در آن $S_e \cong S_h$ می‌باشند، عمل می‌نمایند. اگر این شرط برقرار نباشد، نرخ بازترکیب تقلیل می‌یابد. بعنوان مثال، اگر $(\epsilon_T - \epsilon_{Fi})$ افزایش یابد (یعنی، مرکز مزبور از وسط باند فاصله بگیرد) پس $S_e \gg S_h$ یا $S_h \gg S_e$ خواهد شد. این شرط برای مراکز حقیقی تله و یا ترازهای دهنده (donor) و پذیرنده (acceptor) پابرجاست. در پایان، ذکر این نکته حائز اهمیت است که مراکز بازترکیب حقیقی می‌توانند بعنوان مراکز تولید نیز عمل نمایند. برای یک نیمه‌هادی نوع n با تزریق کم (Low-Level injection)، $n \gg p$ و $n \gg n_i \exp [(\epsilon_T - \epsilon_{Fi}) / K_B T]$ خواهد بود. با این تقریب خواهیم داشت:

$$R = \frac{S_h \vartheta_{th} N_T (np - n_i^2)}{n} \quad (۱۵۶-۲)$$

خاطر نشان می‌گردد که $p_0 = n_0$ و $p_0 = n_i^2$ مقادیر حالت تعادل اند، و با فرض $n \approx n_0$ خواهیم داشت:

(۱۵۷-۲)

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

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

(۱۵۸-۲)

مشاهده می‌شود که طول عمر حاملها، تابع چگالی حاملهای اکثریت (یعنی \mathbf{n}) نیست. عامل محدود کننده نرخ در فرآیند بازترکیب، غلظت حاملهای اقلیت می‌باشد.

باز ترکیب سطحی

(Surface Recombination)

همه خواص بدنه یک نیمه‌هادی به سطح متوقف می‌شوند. سطح مربوط معمولاً شامل باندهای معلق (**dangling band**) و یا باندهایی که بوسیله اتمهای دیگری غیر از اتمهای میزبان در بدنه تکمیل می‌شوند، خواهد بود. یکی از عناصر متداول اکسیژن می‌باشد، بنابراین یک اکسید محلی به سرعت در سطح نیمه‌هادی تشکیل می‌شود. باندهای معلق و باندهای ایجاد شده با اتمهای غیر خودی باعث بوجود آمدن چگالی بالایی از نقص‌ها در سطح نیمه‌هادی می‌گردند. در نتیجه، همانطوریکه در شکل (۲-۲۹) نشان داده شده است، توزیعی از حالت‌های نقص‌های سطحی در شکاف انرژی بوجود می‌آید، و تراز فرمی به جای اینکه بوسیله خنثی بودن بار در بدنه تنظیم شود، بوسیله حالت کلی بار سطحی تنظیم می‌شود. بدلیل حجم زیاد حالت‌های سطحی، باز ترکیب افزایش یافته‌ای در سطح نیمه‌هادی بوجود می‌آید. چگالی حالت سطح N_{ST} مطابق شکل (۲-۳۰)، معمولاً بوسیله تابع دلتا در سطح مشخص می‌شود. هنگامیکه نور به چنین سطحی بتابد، اکثر آن قبل از رسیدن به بدنه، در محدوده سطح باز ترکیب می‌شود. این امر به شدت برای عملکرد اکثر قطعات الکترونیک نوری زیانبار است و سطح نیمه‌هادی به تعامل خاصی نیازمند خواهد بود. بدلیل چگالی زیاد مراکز ترکیب در سطح، توزیع

حامله‌های اقلیت اضافی در نیمه‌هادی، مطابق شکل (۲-۳۰) خواهد بود. فرض بر آن است که چگالی حالت‌های سطحی N_{ST} تا به ضخامت X_1 به درون ماده ادامه می‌یابد. لذا نرخ بازترکیب سطحی R_s همانند رابطه ۲-۱۵۷ به فرم زیر می‌باشد:

$$R_s = S_h \vartheta_{th} N_{ST} X_i [p(0) - p_0] \quad (۲-۱۵۹)$$

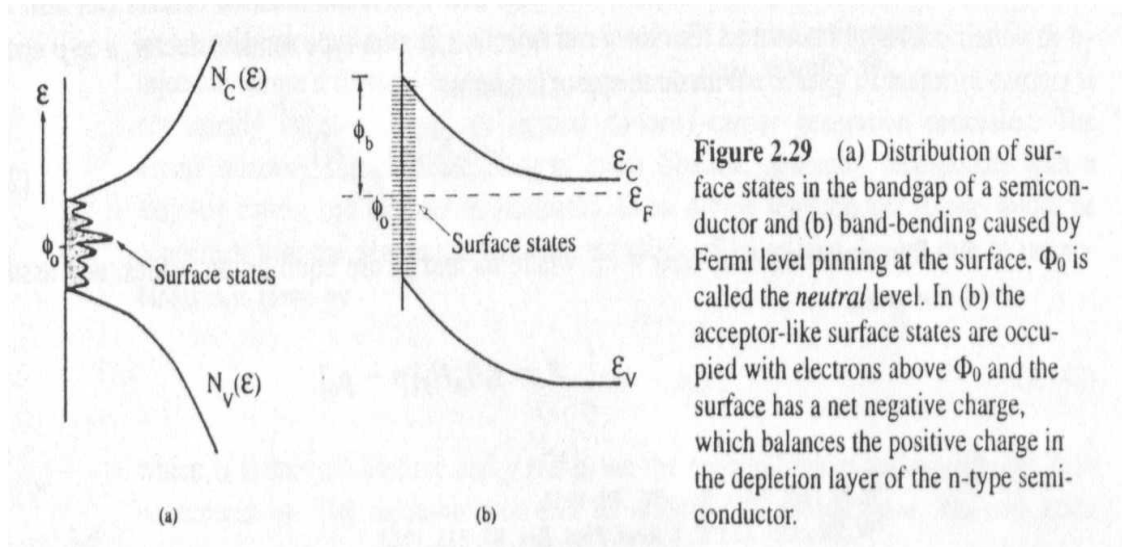
بطوریکه مجدداً فرض شده که ماده مورد نظر نوع n باشد و حفره‌ها، حامله‌های اقلیت را تشکیل می‌دهند. در شرایط پایدار، R_s باید مساوی شار حامله‌های اقلیت به درون ناحیه سطح باشد. لذا:

$$D_h \left. \frac{\partial p}{\partial x} \right|_{x=0} = S_h \vartheta_{th} N_{ST} X_L [P(0) - P_0] = S_R [P(0) - P_0] \quad (۲-۱۶۰)$$

بطوریکه:

$$S_R = S_h \vartheta_{th} N_{ST} \quad (۲-۱۶۱)$$

سرعت بازترکیب سطحی می‌باشد. این عبارت معیاری از نرخ چگالی بازترکیب سطحی و یا چگالی نقص‌های مربوطه می‌باشد.



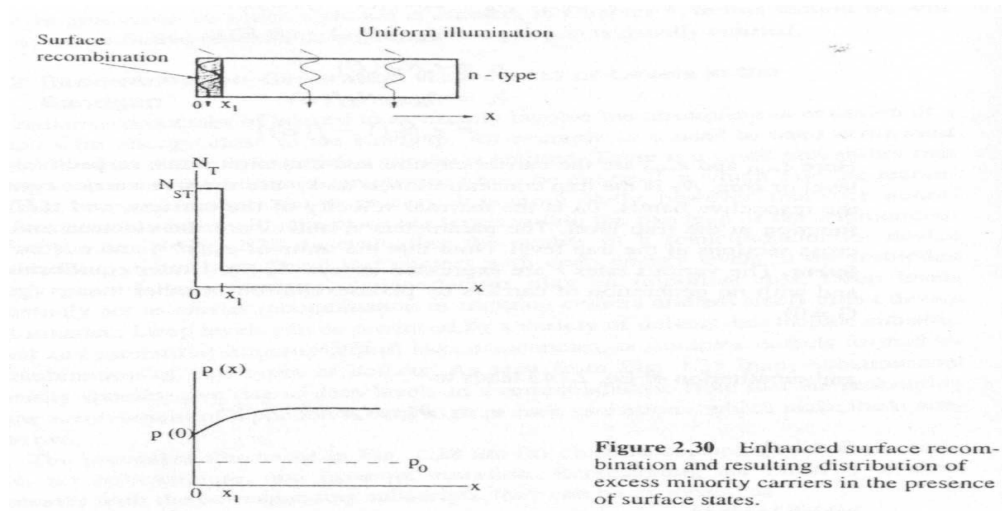


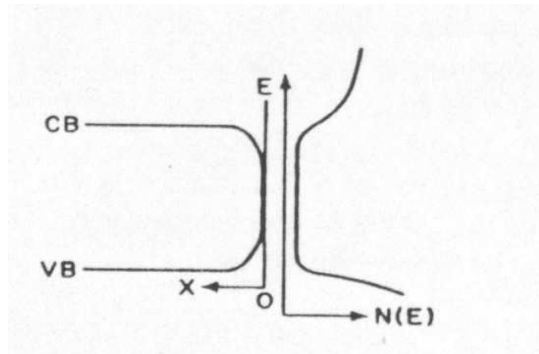
Figure 2.30 Enhanced surface recombination and resulting distribution of excess minority carriers in the presence of surface states.

بازترکیب سطحی را می‌توان با ایجاد سطح غیرفعال بوسیله یک دی‌الکتریک مانند دی‌اکسید سیلیکون یا نیتراید سیلیکون، و یا بوسیله یک پیوند نامتجانس در سطح آزاد، کاهش داد. در هر دو مورد، ماده با شکاف انرژی بزرگتر بالای سطح آزاد، نه تنها بازترکیب سطحی را کاهش می‌دهد، بلکه بعنوان یک پنجره برای قطعاتی مانند آشکار ساز یا سلول خورشیدی عمل می‌کند، و از طریق آن، نور لازم برای لایه فعال مورد نظر جذب می‌شود. در نتیجه‌گیری این بخش، می‌توان خاطر نشان کرد که بازترکیب‌های غیرتشعشی بدنه‌ای و سطحی برای عملکرد قطعات الکترونیک نوری به شدت زیان آورند. این مراکز، که بعضی اوقات «مراکز کُشنده» (Killer Centers) نیز نامیده می‌شوند، با ایجاد یک مسیر انحرافی غیرتشعشی باعث از بین رفتن حاملهای اضافی می‌شوند. فرآیندهای مهم تشعشی در یک نیمه‌هادی را بعداً مطالعه خواهیم کرد.

در اینجا به بحثی که کتاب **pankove** در زمینه بازترکیب سطحی آورده است می‌پردازیم:

یک سطح، اختلال قوی از یک شبکه است و دارای باندهای معلق است که می‌تواند ناخالصی‌ها را از محیط جذب کند. بنابراین می‌تواند غلظت زیادی از سطوح عمیق و کم عمیق را ایجاد کند، و این سطوح می‌تواند بعنوان مراکز بازترکیب عمل نمایند. اگرچه هیچ نشانه متمایز کننده‌ای برای یک توزیع یکنواخت حالتها وجود ندارد، وقتی یک توزیع یکنواخت در نظر گرفته می‌شود. توزیع حالت‌های

سطح عبارت است از $N_3(E) = 4 \times 10^4 \text{ Cm}^{-2}\text{ev}^{-1}$. شکل (۷-۳) مدلی از توزیع حالت‌های پیوسته را در سطح یک نیمه‌هادی نشان می‌دهد. واضح است وقتی الکترون‌ها و حفره‌ها در فاصله یک طول پخش از سطح قرار دارند، آنها می‌توانند با یکدیگر بازترکیب شوند، و بصورت غیرتثبیلی بین حالات پیوسته گذار نمایند. این مدل می‌تواند با مفهوم یک سطح داخلی سازگار باشد، که ما آنرا عیب (defect) یا یک inclusion می‌نامیم.



شکل (۷-۳) : مدل توزیع پیوسته از حالت‌های سطح

باز ترکیب اوژه (Auger Recombination)

باز ترکیب از طریق سطوح عمیق، باعث ایجاد یک مسیر موازی غیر تشعشعی برای تلفات انرژی تشعشعی بر مبنای شکاف انرژی می‌گردد. فرآیند دیگر غیر تشعشعی که در نیمه‌هادی‌های با آرایش زیاد مهم است، باز ترکیب اوژه می‌باشد. فرآیند اوژه یک فرآیند باز ترکیب غیر تشعشعی سه حاملی است که در آن انرژی اضافی آزاد شده توسط باز ترکیب یک جفت الکترون و حفره در بر خورد کولمبی، تبدیل به انرژی جنبشی حامل سومی می‌شود که از لحاظ انرژی به عمق باند مربوطه صعود می‌کند. نتیجتاً حامل گرم شده و به ته باند برمی‌گردد. فرآیندهای مختلف ممکنه در نیمه‌هادی، شامل الکترون‌ها و حفره‌های اضافی بصورت نشان داده شده در شکل (۳-۲۳) می‌باشند. نرخ باز ترکیب کلی وابسته به تجمع حاملها که به گسیل خود بخودی می‌انجامد را می‌توان به صورت زیر بیان نمود،

$$R(n) = An + Bn^2 + Cn^3 \quad (۳-۹۱)$$

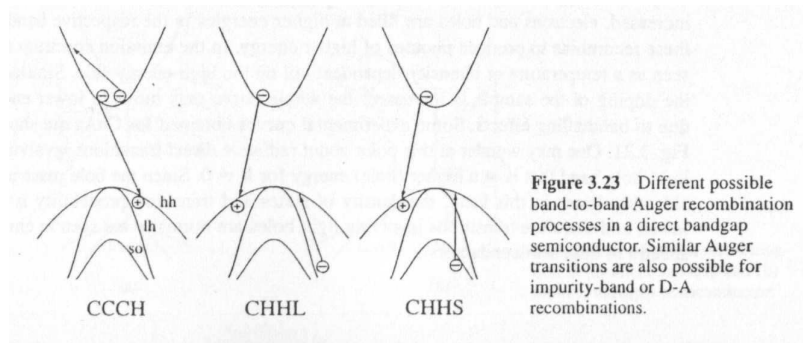
در این معادله، اولین جمله سمت راست، برای "باز ترکیب شاکلی-رد-هال" در نقص‌ها و تله‌هاست. و $A = S V_{th} N_T$ می‌باشد. جمله دوم جهت "باز ترکیب تشعشعی خود بخودی" منظور می‌گردد، و جمله سوم برای "باز ترکیب اوژه" است که نقش مهمی در عملکرد لیزرهای پیوندی بازی میکند. قابل ذکر است که جمله‌های دوم و سوم سمت راست معادله (۳-۹۱) برای توزیع بولتزمن معتبر است.

نرخ بازترکیب اوژه که توسط رابطه Cn^3 بیان می‌شود، می‌تواند با استفاده از تحلیل مبنایی "بیتی و لندسبرگ" بدست آید. این شکل از نرخ بازترکیب اوژه در سطوح تزریقی خیلی بالا و هنگامی که آمار بولتزمان توسط آمار فرمی-دیراک جایگزین می‌شود شکسته می‌شود. طول عمر حامل برای فرآیند اوژه می‌تواند بصورت $\tau_{Auger} = n / R_{Auger} = (Cn^2)^{-1}$ بیان می‌گردد. این رابطه، تابعی از تمرکز حامل‌های درگیر می‌باشد. ضریب باز ترکیب اوژه C ، مبین خاصیت اساسی نیمه‌هادی است و حد پایین نرخ‌های بازترکیب غیر تشعشعی را معین می‌کند.

احتمالاً بازترکیب اوژه، مؤثرترین فرآیند در بازترکیب‌های بدنه و در چگالی بالای حاملها می‌باشد. انرژی گرفته شده توسط سومین ذره در بازترکیب اوژه در مرتبه شکاف باند انرژی بوده، و بنابراین باید یک مومنتم بزرگ از مرتبه $\sqrt{2 m \varepsilon_g}$ داشته باشد. بقای مومنتم ایجاب میکند که سیستم سه ذره‌ای قبل از واکنش، مومنتم بزرگی داشته باشد. این امر باعث گذاشتن یک حد پایین در انرژی جنبشی می‌گردد، و بدین ترتیب ذرات می‌توانند در بازترکیب اوژه شرکت نمایند. این مقدار بصورت یک انرژی آستانه برای بازترکیب اوژه عمل می‌کند. محاسباتی که بر مبنای انرژی و پراکندگی مومنتم حامل‌های آزاد صورت می‌پذیرد برآوردی از انرژی آستانه برای فرآیندهای مختلف اوژه بدست می‌دهد. راندمان بازترکیب اوژه به تمرکز حامل‌های اضافی بستگی دارد و متناسب با $(K_B T / \varepsilon_g)^{1/2} \exp(-\varepsilon_g / K_B T)$ می‌باشد. بنابراین نرخ فرآیند اوژه با افزایش دما و کاهش شکاف باند انرژی، افزایش می‌یابد. فرآیندهای اوژه در نیمه‌هادی با شکاف باند انرژی باریک، گسترده‌تر می‌باشند و نقش مهمی را در محدود کردن عملکرد لیزرهای پیوندی که با این مواد ساخته می‌شوند، بازی می‌کند. قابل ذکر است که باز ترکیب اوژه در حقیقت عکس فرآیند یونیزاسیون واکنشی است.

فرآیندهای مختلف اوژه که در شکل (۳-۲۳) نشان داده شده است با $CHHL$ ، $CHHS$ و $CCCH$ مشخص شده اند. در اینجا C ، H ، L و S نماینده باندهای هدایت، حفره سنگین، حفره سبک و باند جدا شده (split-off) می‌باشند. بطور مثال $CCCH$ نشان دهنده فرآیند هدایت-هدایت-هدایت-حفره

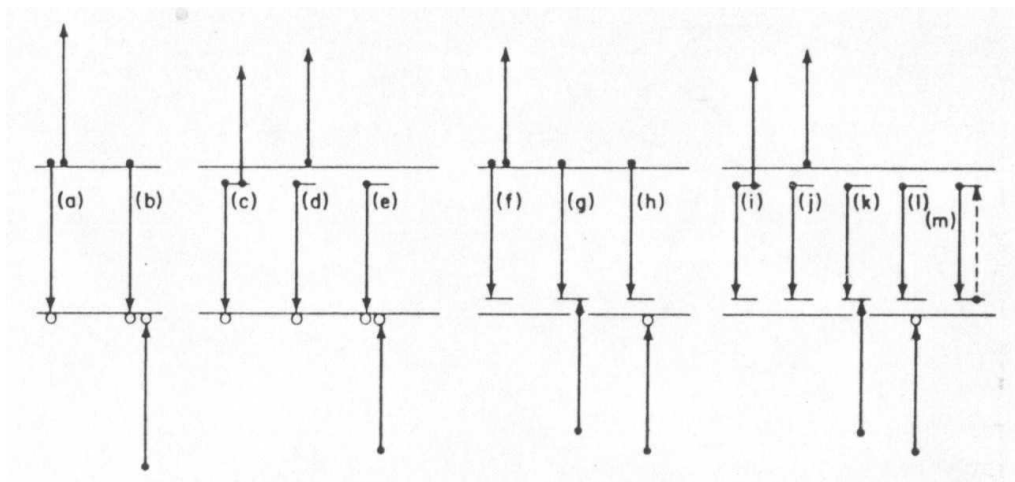
سنگین می‌باشد، که در مواد نوع **n** عمومیت دارد. فرآیند **CHHS** نیز برای موارد که شکاف باند انرژی مواد کاهش می‌یابد، عمومیت دارد. در اینجا فقط در مورد فرآیندهای باند به باند بحث کرده‌ایم. گذارهای مشابه اوژه برای ناخالصی باند دهنده - پذیرنده، و بازترکیب‌هایی که به کمک فوتون و یا تله‌ها صورت می‌پذیرند نیز امکان پذیرند.



شکل (۳-۲۳): فرآیندهای بازترکیب اوژه باند به باند مختلف ممکن در یک نیمه هادی مستقیم

در اینجا به بحثی که کتاب **pankove** در زمینه بازترکیب اوژه آورده است می‌پردازیم: در اثر اوژه، انرژی آزاد شده، ناشی از بازترکیب الکترون، فوراً بوسیله الکترون دیگری جذب می‌شود، که این انرژی بوسیله انتشار فونون‌ها تلف می‌شود. بنابراین «برخورد سه‌حاملی» بصورت درگیری دو الکترون و یک حفره می‌باشد، در نتیجه هیچ فوتون خالصی گسیل نمی‌شود. تعداد زیادی از فرآیندهای اوژه که می‌تواند به وقوع بپیوندد، بستگی به طبیعت گذارهای ممکن و غلظت حامل‌ها دارد. بعضی از این گذارها در شکل ۷-۱ توضیح داده شده‌اند.

در شکل ۷-۱ (a) و (b)، یک انتقال باند به باند در نظر گرفته شده است و الکترون دوم، انرژی آزاد شده در بازترکیب اولین الکترون را، بصورت انرژی جنبشی با تحریک به داخل عمق باند هدایت ماده نوع **n** تبدیل می‌کند، و یا اینکه یک حفره را به ته باند ظرفیت در ماده نوع **p** تبدیل نماید. (در حالت اخیر، این فرآیند بعنوان یک برخورد بین یک الکترون و دو حفره در نظر گرفته می‌شود)



شکل (۱-۷): دیاگرام فرایند اوزه

در شکل ۱-۷- (c) تا (e) گذار از باند دهنده به باند ظرفیت اتفاق می‌افتد و ابزارهای بازترکیب می‌تواند بوسیله یک الکترون در دهنده دیگری یا بوسیله یک الکترون باند هدایت، یا اگر حفره‌ای وجود دارد، بوسیله حفره دوم (فرآیند e) به وقوع بپیوندد. اثرات اوزه با گذارهایی از باند هدایت به گیرنده‌ها در شکل ۱-۷ (f) تا (h) نشان داده شده است؛ و گذارهای دهنده به گیرنده در شکل ۱-۷ (i) تا (l) نشان داده شده است. توجه کنید که در هیچ یک از این فرآیندها، الکترونی که در محله اول برخورد ایجاد کرده به جای خود بر نمی‌گردد و توجه کنید که فرآیندی شبیه شکل ۱-۷ (m) یک اثر اوزه نمی‌باشد، زیرا الکترون دوم می‌تواند انرژی‌اش را بصورت تشعشعی تلف کند. فرآیند شکل ۱-۷ (m) «جذب تشدید کننده» نامیده می‌شود.

واضح است فرآیندی که بستگی به برهمکنش حامل - حامل دارد باید با افزایش غلظت حاملها خیلی

بیشتر شود. بنابراین وقتی با افزایش درجه حرارت، غلظت حامل متناسب با $\left(\frac{K_T}{E_g}\right)^{3/2} \exp\left(\frac{-E_g}{K_T}\right)$

افزایش می‌یابد، طبیعتاً اثر اوزه نیز افزایش می‌یابد. اگرچه، بقای انرژی و مومنت هر دو باید حفظ

شوند. این امر می‌تواند بصورت تئوری پیش‌بینی کند که طول عمر زوج الکترون-حفره τ_A متناسب است با:

$$\tau_A \propto \left(\frac{E_g}{KT}\right)^{3/2} \exp\left(\frac{1+2M}{1+M} \frac{E_g}{KT}\right) \quad (1-7)$$

بطوریکه M نسبت جرمهای مؤثر الکترون و حفره می‌باشد:

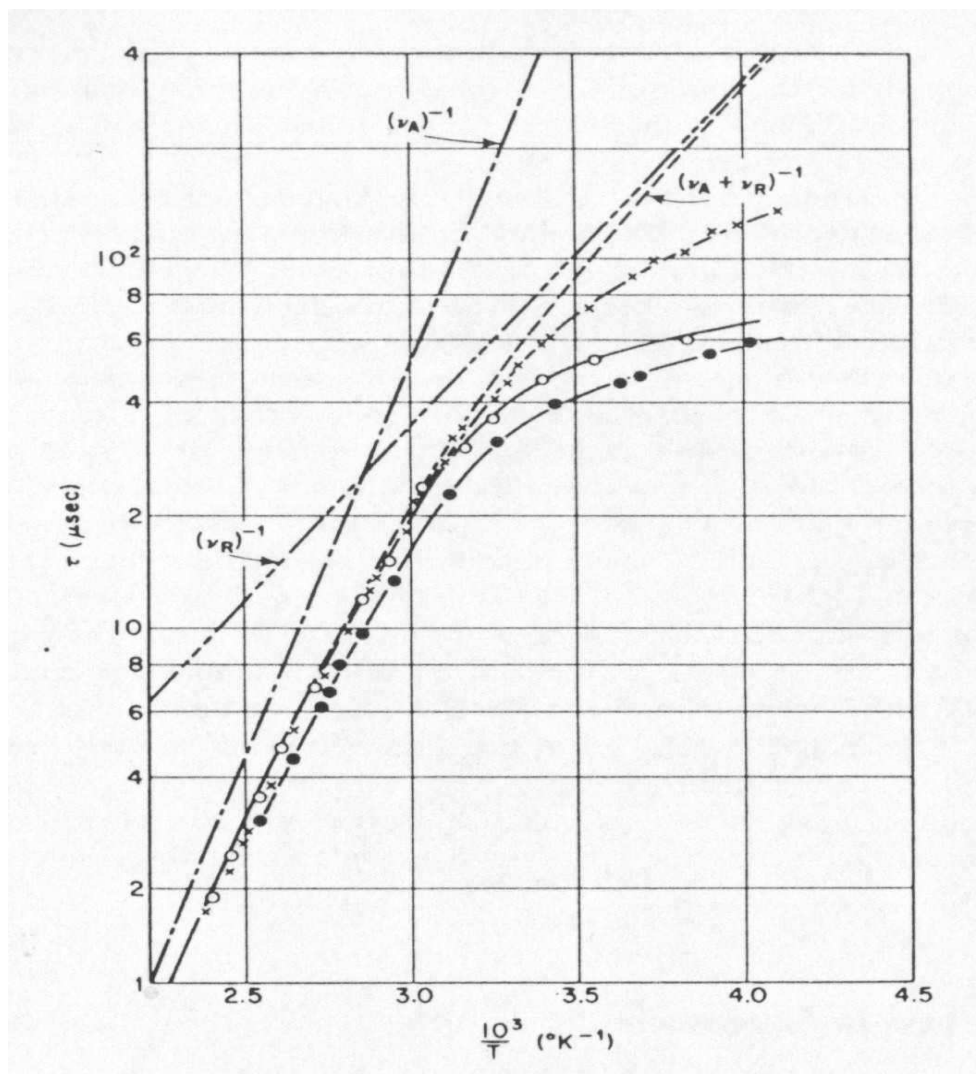
$$M = \frac{m_e}{m_h} \quad \text{if : } m_e < m_h$$

τ_A بوسیله برخورد الکترون-الکترون تعیین می‌شود، و

$$M = \frac{m_h}{m_e} \quad \text{if : } m_h < m_e$$

τ_A بوسیله برخورد حفره-حفره تعیین می‌شود.

طول عمر حامل اندازه‌گیری شده در تلوریم خالص را می‌توان به کمک ترکیب فرآیندهای اوژه و تشعشی تشریح نمود (شکل ۷-۲). در درجه حرارت‌های بالا، کاملاً سازگاری خوبی وجود دارد، به نظر می‌رسد در درجه حرارت‌های پایین، فرآیند سومی که وابستگی ضعیفی به دما دارد، غالب می‌شود.



شکل (۲-۷): طول عمر τ بر حسب $1/T$

یکبار دیگر فرآیندی را در نظر بگیرید که بستگی به برهمکنش حامل- حامل دارد که باید با افزایش غلظت حامل افزایش یابد. این وابستگی می‌تواند در جملاتی از طول عمر حامل اقلیت τ به ترتیب برای نیمه‌هادی‌های نوع n و p بیان شود:

$$\frac{1}{\tau} = Anp + Bn^2$$

$$\frac{1}{\tau} = Anp + Bp^2$$

یا

(۲-۷)

در معادله (۲-۷) n و p چگالی الکترون و حفره می‌باشند. جمله اول در سمت راست معادله، انتقال انرژی به یک حامل اقلیت می‌باشد، و جمله دوم جذب انرژی توسط یک حامل اکثریت را بیان می‌کند. متأسفانه، مطالعه طول عمر حامل بعنوان تابعی از غلظت حامل نمی‌تواند رویداد فرآیند اوزه را نشان دهد، زیرا باز ترکیب تشعشعی نیز از معادله آماری (۲-۷) بدست می‌آید. بنابراین مطالعه طول عمر حامل باید با مطالعه حرکت گسیل حامل کوپل شود.

در نیمه‌هادی با شکاف باند انرژی باریک، مانند **Insb**، فرآیند اوزه، به شدت به درجه حرارت وابسته است، لذا با معادله (۱-۷) بیان می‌شود. در مواد با شکاف انرژی بزرگ، فرآیند اوزه وابسته سطح آلاینش می‌باشد و این فرآیند در نیمه‌هادی واگن بسیار مهم می‌باشد. معمولاً در درجه حرارتهای پایین، وقتی غلظت اتمهای دهنده یا گیرنده بیشتر از غلظت آستانه می‌شود، راندمان فوتولومینانس نیمه‌هادی‌ها به سرعت کاهش می‌یابد. بنابراین در **Gap** غلظت آستانه N_T در حدود 10^{18} Cm^{-3} می‌باشد. در غلظت‌های ناخالصی کم و تا N_T ، راندمان لومینانس ثابت است، ولی در غلظت 10^{19} Cm^{-3} راندمان لومینانس با ضریب 10^4 از مقدار اولیه‌اش در غلظتهای کم، افت خواهد کرد.

در غلظت‌های بالاتر از N_T ، توابع موج الکترون در مجاورت یکدیگر همپوشانی خواهند داشت، لذا الکترونها (یا حفره‌ها) متمرکز نخواهند بود و تغییرات برای تحریک اوزه از حامل غیر متمرکز افزایش خواهد یافت. انرژی حامل تحریک شده در یک زنجیره گسیل فونون‌های نوری بر اساس بقای انرژی و مومنتم، تلف خواهد شد.

توجه کنید که اگرچه غلظت بحرانی N_T ممکن است بصورت تئوری آغاز اثر اوزه باشد، در غلظتهای ناخالصی بیشتر از 10^{19} Cm^{-3} ، مکانیزمهای دیگر می‌توانند جانشین شوند. باید اشاره کرد اگرچه اثر اوزه برای تلف فوتونهای مورد انتظاری که در باز ترکیب تشعشعی محدود، تولید می‌شود، به حساب می‌آید، اما اثر اوزه می‌تواند پاسخگوی دیگر پدیده‌هایی هم که نیازمند انرژی یا حاملهای داغ هستند، باشد. زیرا یک حامل داغ ناشی از برهمکنش اوزه می‌باشد. بنابراین یک الکترون داغ از نیمه‌هادی

می‌تواند گسیل کند، یا الکترون داغ می‌تواند بصورت تشعشعی برای تولید فوتون پرنرژی‌تر ترکیب شود. بطور مشابه یک حفره داغ می‌تواند بر سدهای داخلی در نیمه‌هادی غلبه کند و یک رخداد قابل آشکار در آن طرف سد تولید کند، یا می‌تواند در دومین بازترکیب تشعشعی که در انرژی فوتون بالاتری نسبت به اولین بازترکیب قرار دارد، شرکت کند. اثر بعدی در الکترو لومینانس ژرمانیم مشاهده می‌شود، جائیکه علاوه بر بازترکیب تشعشعی باند به باند، گسیل انرژی بالای فوتون مشاهده می‌شود، و تا انرژی‌هایی تا دو برابر انرژی شکاف گسترش می‌یابد. در این حالت، یگ گذار به اندازه شکاف انرژی (0.7eV) یک حفره را به زیر باند Split-off از باند ظرفیت تحریک می‌کند، در اینجا این حفره می‌تواند با یک الکترون باند هدایت بازترکیب شود، و فوتونهایی در حدود 1.3eV منتشر کنند. اگر این گسیل نزدیک سطح اتفاق بیافتد، به احتمال زیاد جذب نخواهد شد، و بنابراین می‌تواند آشکار شود. در انتهای آنالیز تلفغات «غیر تشعشعی»، باید گفت که فقط بازترکیبی بطور قطع اثر اوژه می‌باشد که علامت مشخصی از حامل داغ وجود داشته باشد.

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)