

## بررسی تابش کانالی از بلورهای الماس به منظور تهیه پرتو X تک انرژی در شتاب دهنده خطی الکترون ELBE

بهنام آزادگان

گروه فیزیک دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار

پست الکترونیکی: azadegan@hsu.ac.ir

### چکیده

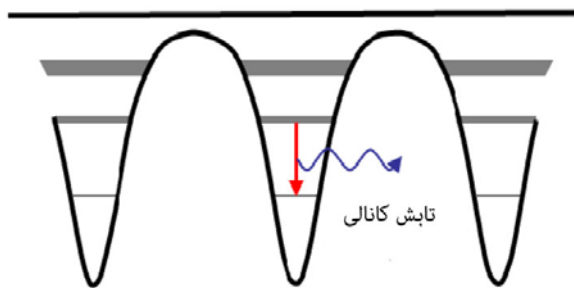
آزمایش‌های تابش کانالی الکترون در شتاب دهنده خطی الکترون ELBE در مؤسسه تحقیقاتی روزندورف درسدن آلمان انجام شده است. هدف از انجام این سری از آزمایش‌ها تلاش برای بهینه کردن بهره تابش و پهنای خطوط طیفی به منظور کاربرد تابش کانالی در تهیه پرتو X تک انرژی بوده است. بلورهای الماس با توجه به دمای دبای بالا و رسانندگی گرمایی بالایشان می‌توانند در جریان‌های الکترون نسبتاً بالا به کار برده شوند. آزمایش‌های تابش کانالی از صفحه (۱۱۰) در انرژی‌های الکترون ۱۴٫۶، ۱۷، ۳۰ و ۳۴ مگا الکترون ولت با استفاده از بلورهای الماس با ضخامت‌های ۴۲٫۵، ۱۰۲، ۱۶۸ و ۵۰۰ میکرومتر انجام شده‌اند. این نتایج منجر به نصب یک چشمه پرتو X در شتاب دهنده خطی الکترون ELBE شده است. باریکه الکترون با میانگین جریان تا ۲۰۰  $\mu\text{A}$  اجازه می‌دهد تا نرخ فوتون به  $10^{10} \text{ s}^{-1}$  تا  $10^{11} \text{ s}^{-1}$  بر  $10\%$  پهنای باند برسد. انرژی فوتون می‌تواند با تغییر انرژی باریکه الکترون تنظیم شود. تک انرژی کردن تابش کانالی و حذف تابش ترمزی زمینه با به کار بردن پراش پرتو X در یک بلور گرافیت بررسی شده است.

واژه‌های کلیدی: تابش کانالی، پرتو X، بلور الماس

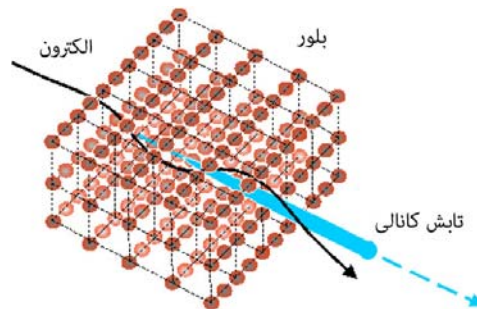
### ۱. مقدمه

نسبت به صفحه تحت بررسی بلور، وارد بلور می‌شوند (شکل ۱). توصیف تابش کانالی بر پایه تقسیم حرکت الکترون به یک مولفه عرضی و یک مولفه طولی می‌باشد. حرکت طولی الکترون‌ها از میان بلور با سرعت نسبی  $\beta = \frac{v}{c} \approx 1$  دنبال می‌شود. تحت شرایط کانالی، مولفه عرضی اندازه حرکت خطی در مقایسه با مولفه طولی کوچک است و از اینرو انرژی عرضی می‌تواند به وسیله رابطه غیر نسبی بیان شود و حرکت عرضی به وسیله عمل پتانسیل تناوبی متوسط، مطابق با صفحه مورد بررسی توصیف شود. رفتار مکانیک کوانتمی تابش کانالی در

تابش کانالی به وسیله ذرات باردار نسبیتی در مدت عبورشان از میان یک تک بلور، موازی با یک صفحه یا محور بلور گسیل می‌شود [۱]. در بررسی‌های پیشتر انجام شده روشن شده است که تابش کانالی ممکن است به صورت یک چشمه تک انرژی پرتو X با قابلیت تنظیم انرژی به کار گرفته شود. تئوری تابش کانالی در انرژی‌های الکترون کمتر از ۱۰۰ MeV در چارچوب مکانیک کوانتمی توصیف می‌شود [۲]. در تابش کانالی صفحه‌ای الکترون‌های نسبیتی تحت یک زاویه فرودی کوچک



شکل ۲. توصیف کوانتومی تابش کانالی صفحه‌ای.



شکل ۱. طرح واره تابش کانالی صفحه‌ای.

عمود به صفحه و  $\gamma$  ثابت لورنتس است. نظر به اینکه پتانسیل بلور تناوبی است جواب‌های معادله (۱) امواج بلاخ هستند.

$$u(x) = e^{ikx} \sum_n c_n e^{ingx} \quad (n = \dots, -1, 0, 1, 2, \dots), \quad (2)$$

که بردار موج الکترون و  $g$  بردار شبکه وارون صفحه مورد بررسی است. پتانسیل پیوسته بسط داده شده به یک سری فوریه به صورت زیر بیان می‌شود.

$$V(x) = \sum_n v_n e^{ingx} \quad (n = \dots, -1, 0, 1, 2, \dots) \quad (3)$$

که  $v_n$  نشانگر ضرایب فوریه پتانسیل پیوسته است. با استفاده از تقریب دوپلی-تورنر [۳] برای برهمکنش الکترون اتم این ضرایب به صورت زیر بیان می‌شوند.

$$v_n = \frac{2\pi z_1}{V_c} a_0^3 \cdot (e^{\gamma} / a_0) \sum_j e^{-M_j(\bar{g})} e^{(-i\bar{g} \cdot \bar{r}_j)} \sum_{i=1}^4 a_i e^{\left(\frac{b_i}{4\pi} (ng)^{\gamma}\right)}, \quad (4)$$

که  $V_c$  حجم شبکه وارون،  $a_0$  شعاع بوهر،  $e$  بار الکترون،  $\bar{r}_j$  مختصات  $j$ امین اتم در شبکه واحد را نشان می‌دهند،  $b_i$  و  $a_i$

ضرایب جدول بندی شده هستند و  $M_j(\bar{g}) = \frac{1}{\gamma} g^{\gamma} \langle u_j^{\gamma} \rangle$  فاکتور دبی-والر را نشان می‌دهد که ارتعاشات حرارتی  $j$ امین اتم با دامنه میانگین مربعی  $\langle u_j^{\gamma} \rangle$  را توصیف می‌کند. ساختار بلور الماس ممکن است به وسیله یک شبکه fcc با دو اتم پایه یا به طور معادل به وسیله یک شبکه مکعبی با ۸ اتم پایه نمایش داده شود. جایگذاری روابط (۲) و (۳) در معادله (۱)، مسئله را به حل ویژه مقادیر یک ماتریس  $A$  منجر می‌کند که در مورد صفحه‌ای شامل مولفه‌های زیر است.

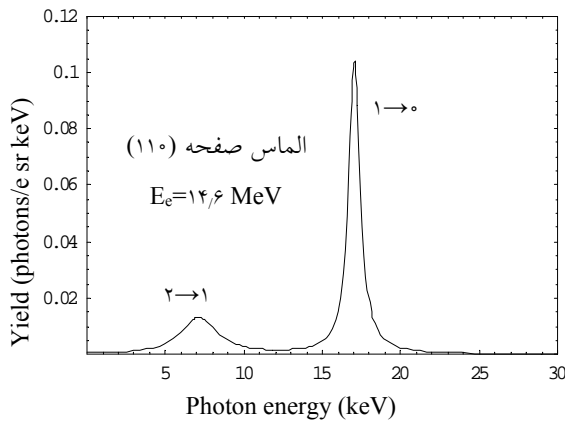
انرژی‌های الکترون کمتر از ۱۰۰ MeV منجر به حالت‌های انرژی عرضی مجزا یا باندهایی می‌شود که ذرات می‌توانند اشغال کنند [۲]. تابش کانالی در نتیجه یک گذار الکترون بین ترازهای انرژی است (شکل ۲). در آزمایش‌های انجام گرفته شده انرژی‌های الکترون بین ۱۰ تا ۴۰ MeV محدود شده بود و در نتیجه مکانیک کوانتومی مورد استفاده قرار گرفته است. از آنجایی که تابش کانالی به وسیله حرکت الکترون‌هایی با سرعت‌های نسبی در چارچوب آزمایشگاه گسیل می‌شود الگوی تابش دو قطبی به یک مخروط تابشی خیلی باریک رو به جلو انتقال می‌یابد و بسامدهای تابش به گستره پرتو X انتقال دوپلر پیدا می‌کنند.

## ۲. تئوری

وقتی یک ذره باردار نسبیتی از میان یک تک بلور موازی با بعضی محورها یا صفحه‌ها عبور می‌کند تابش کانالی گسیل می‌کند. در انرژی‌های متوسط الکترون، گسیل تابش مطابق با یک گذار خود به خودی از ذره میان دو ویژه حالت عرضی در پتانسیل پیوسته آن محور یا صفحه بلور است. محاسبه ویژه مقادیر و انرژی‌های گذار تابش، یک مسئله چند باریکه‌ای را نشان می‌دهد. در مورد تابش کانالی صفحه‌ای ویژه حالت‌ها می‌توانند به وسیله حل معادله شرودینگر یک بعدی محاسبه شوند.

$$\left[ \frac{p_x^2}{2my} + V(x) \right] u(x) = E_x u(x), \quad (1)$$

که  $m$  جرم سکون الکترون،  $x$  نشانگر مختصات عرضی الکترون

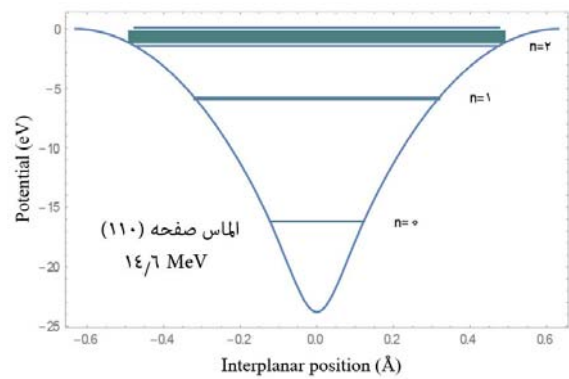


شکل ۴. طیف تابش کانالی از صفحه (۱۱۰) الماس محاسبه شده برای الکترون‌های ۱۴٫۶ MeV.

برای انرژی الکترون ۱۴٫۶ MeV به ترتیب به وسیله خطوط افقی و خطوط پهن با ضخامت‌های مختلف نشان داده شده‌اند. طیف تابش کانالی برای صفحه (۱۱۰) از ۴۲٫۵  $\mu\text{m}$  الماس، محاسبه شده با رابطه (۶) در شکل ۴ نشان داده شده است.

### ۳. آزمایش‌ها

چشمه تابش ELBE بر پایه یک شتاب دهنده خطی الکترون است که در یک بسامد ۱٫۳ GHz عمل می‌کند. انرژی باریکه الکترون می‌تواند بین ۶ تا ۳۵ MeV در یک جریان باریکه متوسط بیشینه ۱ میلی‌آمپر تغییر کند. بعد از انحراف باریکه الکترون از سالن شتاب دهنده به سالن فیزیک تابش، از اتاقک خلأ فوق‌العاده بالا که بین مگنت ۱ و ۲ قرار گرفته عبور می‌کند (شکل ۵). این اتاقک یک گانومتر ۳ محوره را، که برای جهت گیری دقیق بلور الماس نسبت به باریکه الکترون استفاده شده، در خود جای داده است. تابش کانالی و تابش ترمزی تولید شده و گسیل شده در جهت باریکه الکترون عبوری بعد از عبور از لوله خلأ شتاب دهنده، از میان ۴۵ cm هوا عبور می‌کند و به وسیله یک آشکارساز نیم رسانای حالت جامد مانند سلیکون یا کادمیوم-تلوراید ثبت می‌شود. برای نمونه تابش ترمزی به هنجار شده و طیف تابش کانالی برای صفحه (۱۱۰) از الکترون‌های ۱۴٫۶ MeV در بلور الماس ۴۲٫۵  $\mu\text{m}$  ضخامت در



شکل ۳. پتانسیل پیوسته صفحه (۱۱۰) الماس و ویژه مقادیر (باند‌ها) محاسبه شده برای الکترون‌های ۱۴٫۶ MeV.

$$A_{nm} = v_{n-m} \quad (n \neq m),$$

$$A_{nm} = \frac{\hbar^2}{2my} (k + ng)^2 + v_n. \quad (5)$$

ویژه مقادیر و ویژه توابع انرژی از قطری کردن ماتریس  $A$  حاصل می‌شوند. گذار خود به خودی یک الکترون کانالی از یک حالت عرضی بالاتر به پایین‌تر منجر به گسیل فوتون تابش کانالی می‌شود. چگالی زاویه‌ای طیفی به دست آمده از تقریب دو قطبی بر واحد انرژی فوتون بر واحد زاویه فضایی بر الکترون از رابطه زیر به دست می‌آید [۴].

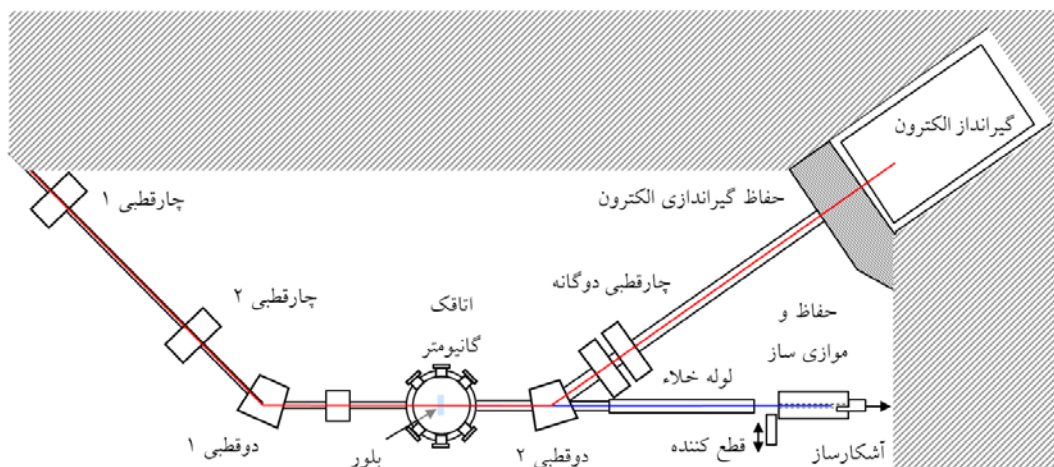
$$\frac{d^2 N_{CR}(i \rightarrow f)}{d\Omega_\gamma dE_\gamma} = \frac{\alpha \lambda_c^2}{\pi \hbar c} \gamma^2 (E_i - E_f) \left| \left\langle \psi_f \left| \frac{d}{dx} \right| \psi_i \right\rangle \right|^2$$

$$\times \int_0^L dz e^{-\mu(E_\gamma)(L-z)} P_i(z) \times \pi^{-3/2}$$

$$\times \int_0^{+\infty} \frac{t^{-1/2} \Gamma_T (1 + \alpha^2 t) e^{-t}}{(E_\gamma (1 + \alpha^2 t) - E_i)^2 + 0.25 (1 + \alpha^2 t)^2 \Gamma_T^2} dt, \quad (6)$$

که  $\lambda_c$  طول موج کامپتون،  $P_i(z)$  تابع اشغال حالت  $i$  در عمق  $z$  بلور،  $\Gamma_T$  نشان دهنده پهنای خط طیفی،  $\alpha$  پارامتر نامتقارن ناشی از پراکندگی چند گانه الکترون در بلور،  $E_i = \gamma^2 (E_i - E_f)$  انرژی فوتون گسیل شده در  $\theta = 0$  و  $\mu(E_\gamma)$  نشان دهنده ضریب جذب پرتو X با انرژی  $E_\gamma$  است. نحوه محاسبه توابع اشغال و پهنای خطوط طیفی در مرجع [۴] آمده است.

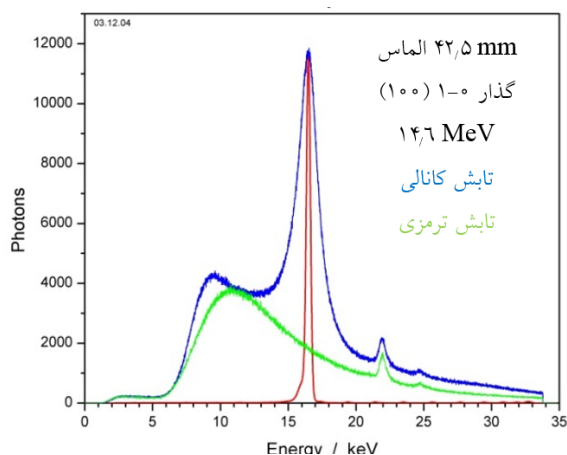
برای نمونه، شکل پتانسیل صفحه (۱۱۰) بلور الماس در شکل ۳ نشان داده شده است. ویژه مقادیر و باندهای بلاخ محاسبه شده



شکل ۵. طرح سالن فیزیک تابش در ELBE.

شکل ۶ نشان داده شده‌اند. کاربرد تابش (۱۱۰) الماس اندازه گیری شده برای الکترون‌های ۱۴.۶ MeV.

کانالی برای تحقیقات رادیو بیولوژیک نیازمند جداسازی خط طیف تابش کانالی از تابش ترمزی زمینه است. به منظور اینکه شدت تابش کانالی تا جایی که ممکن است باقی بماند، تک انرژی کردن بر پایه بازتاب براگ با استفاده از بلور با نظم خیلی بالای گرافیت (HOPG) صورت گرفته است [۵]. طیف انرژی تابش کانالی با و بدون HOPG در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶. طیف تابش کانالی (آبی) و تابش ترمزی (زرد) به همراه طیف تک انرژی شده با استفاده از بلور گرافیت (قرمز) از صفحه

### مراجع

1. M A Kumakhov and F F Komarov, *Phys. Lett.* **57** (1976) 17.
2. J U Andersen, S K Andersen, and W M Augustyniak, *Kong. Danske. Vid. Selsk. Mat. Fys. Medd.* **10** (1977) 39.
3. P A Doyle and P S Turner, *Acta Crystallogr., Sect. A* **24** (1968) 390.
4. B Azadegan, L Sh Grigoryan, J Pawelke and W Wagner, *Phys. Rev. B* **41** (2008) 235101.
5. W Wagner, B Azadegan, M Sobiella, J Steiner, K Zeil, and J Pawelke, *Nucl. Ins. and Meth. in Phys. Re. B* **266** (2008) 327.