

ساختمان اتمی کریستال کشت شده و اثرات کانالی درکشت یونی

داریوش فتحی، گروه مواد هسته‌ای
احمد رشیدی نیا، گروه فیزیک پلاسما
سازمان انرژی اتمی ایران

چکیده

تغییرات ساختمان اتمی کریستال سیلیکون (Si) بعد از برخورد یونهای بیسموت (Bi) در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. مشاهداتی از اثرات برخورد یون‌ها با کریستال مورد کشت، درقسمتهایی از کریستال که در آنها برخوردهای متوالی (subcascade و cascade) صورت گرفته نشان داده شده است. ناحیه‌هایی از کریستال که تعدادی از این برخوردهای متوالی برهم منطبق شده‌اند، دارای مرکزی غیر کریستالی آمرف (Amorphous) میباشند و نواحی محصور آن با بهم خوردگیهای با چگالی زیاد میباشند. نتایج بدست آمده با مدل‌های (simulation) که برای تخریب یونهای با انرژی مشابه محاسبه شده است دراین مقاله مورد مقایسه قرار گرفته است. اثرات کاشت در جهت کانالی و غیرکانالی بر روی انرژی تبادل بین یونها و کریستال نیز نشان داده شده است.

مقدمه

یونهای انرژی دار درموقع کشت میتوانند از سطح مورد کشت نمونه داخل شده و انرژی خود را بوسیله برخورد با الکترونهای هسته اتمهای (Nuclei) نمونه مورد کشت از دست بدهند. این انرژی نهایتاً تبدیل به انرژی حرارتی در نمونه میشود. اگر انرژی اولیه را E_T فرض کنیم این انرژی بدو قسمت تقسیم میشود: اول انرژی یونیزه شدن نمونه E_i که همان انرژی میباشد که صرف تحریک کردن الکترون‌ها میشود و دیگر انرژی مصرفی برای تغییر مکان اتمهای جایجا شده E_D ، در اینجا رابطه انرژی را میتوان بصورت $E_T = E_D + E_i$ نوشت. اگر مقدار انرژی E_D بزرگتر از E_i ، انرژی لازم برای از جا کردن یک اتم،

باشد تغییر مکان اتمهای نمونه صورت میگیرد.

تعداد اتمهای جابجا شده بوسیله یک یون برخوردی با انرژی زیاد بوسیله رابطه $\langle v \rangle = \frac{KE_D^2}{2E_d}$ برای $E_D = \frac{2E_d}{K}$ بدست میآید که K بسازده جایجائی میباشد. مقدار E_d برابر 12eV برای سیلیکون میباشد.

همانطور که در جدول ۱ نشان داده شده است نسبت مقدار تخریب اتمی با انرژی یونهای تابشی رابطه معکوس دارد. بطوریکه درصد تخریب با ازدیاد انرژی یونها کم میشود. همینطور مقدار تخریب با کم شدن جرم یونها کم میشود و بالاخره عمق نفوذ یونها با انرژی اولیه یونها نسبت مستقیم دارد. در صورتیکه تبادل انرژی بین یونها و

داریوش فتحی و احمد رشیدی نیا . ساختمان اتمی کریستال کشت شده

حدول ۱- خلاصه‌ای از پارامترهای کشت یونی که محاسبه شده‌اند را نشان می‌دهد. اعداد این جداول با استفاده از برنامه EDEP-1 مذکور در منبع ۱ بدست آمده است. برای انرژی اولیه یونهای کاشت شده مقادیر عمق نفوذ و اثرات آماری استراگلینگ (Stragglng Damage) محاسبه شده است.

نوع یون	انرژی (KeV)	عمق نفوذ Pp A°	ΔR_p A°	محل ماکزیمم تخریب A°	انرژی تخریب (KeV)	انرژی تخریب (%)
۲۸ Si ⁺	۱۴	۲۰۲	۹۹	۱۲	۱۰/۶۸	۷۶/۳
	۲۸	۳۷۹	۱۷۴	۹۰	۱۷/۴۰	۶۲/۱
	۵۶	۷۴۶	۳۱۰	۳۰۰	۳۲/۱۲	۵۷/۴
	۱۴۰	۱۹۱۰	۶۳۱	۱۱۵۰	۶۲/۶۷	۴۴/۸
	۲۰۰	۲۷۵۲	۷۹۹	۱۸۳۰	۷۸/۸	۳۹/۸
۱۱ B ⁺	۱۱	۴۲۸	۲۰۶	۱۱۰	۵/۸۵	۵۳/۲
	۲۲	۸۷۱	۳۵۰	۴۲۰	۹/۹۸	۴۵/۴
	۵۵	۲۲۱۷	۶۶۷	۱۵۰۰	۱۷/۸۴	۳۲/۴
	۱۰۰	۳۹۲۲	۹۳۷	۲۸۸۰	۲۳/۸۴	۲۳/۸
	۲۰۰	۷۱۶۱	۱۲۵۹	۶۰۰۰	۳۰/۷۵	۱۵/۴
۷۵ As ⁺	۳۸	۲۵۶	۹۶	۰	۲۷/۴	۷۳/۲
	۷۵	۴۵۴	۱۶۸	۷۰	۴۹/۹۲	۶۶/۶۰
	۱۰۰	۵۸۴	۲۱۳	۱۳۰	۶۳/۶۳	۶۳/۶
	۱۵۰	۸۴۶	۳۰۲	۲۸۰	۸۹/۳۰	۵۹/۵
	۳۷۵	۲۰۸۴	۶۶۹	۱۱۵۰	۱۷۱/۵۶	۴۵/۷
۱۲۱ Sb ⁺	۶۰	۳۰۸	۹۷	۰	۴۳/۸۹	۷۳/۲
	۱۲۱	۵۲۹	۱۶۵	۴۰	۷۹/۹۵	۶۶/۱
	۲۰۰	۸۰۵	۲۴۹	۲۰۰	۱۲۲/۸۲	۶۱/۴
	۲۴۲	۹۵۱	۲۹۲	۳۴۰	۱۴۳/۹۱	۵۹/۵
۲۰۸ Bi ⁺	۵۰	۲۴۲	۶۰	۰	۳۵/۴۸	۷۰/۴۶
	۱۰۰	۳۹۴	۹۸	۰	۶۸/۴۰	۶۸/۴
	۲۰۸	۶۷۷	۱۶۸	۰	۱۳۳/۳۴	۶۴/۱۱
	۵۸۸	۱۳۶۳	۳۳۵	۴۵۰	۲۸۶/۶۴	۵۷/۳۳

متوالی دارند. اندازه این نواحی همانطوریکه نشان داده خواهد شد در حدود $12-20 \text{ A}^\circ$ میباشند. برای تولید یک ناحیه از برخورد متوالی با اندازه 10 A° حداقل انرژی برابر با 1 KeV مورد نیاز میباشد. در این انرژی اتمهایی مانند انتیموان (Sb) که دارای جرم زیادی هستند قادرند مقدار

اتمهای نمونه مورد کشت طوری باشد که انرژی داده شده E_D بیشتر از ده برابر E_d باشد، این اتمهای ثانویه بنوبه خود قابلیت تغییر مکان دیگر اتمها را پیدا میکنند و یک حالت برخورد متوالی (cascade) بوجود میآید. یونهای ثانویه با انرژی کم بین $5-1 \text{ KeV}$ بزرگترین اثر را در ایجاد برخورد

شرایط آزمایش

کریستال‌های سیلیکون با جهات مختلف کریستالی (110) و (100) مورد کاشت یون‌های ^{208}Bi یا انرژی‌های ۱۰۰ KeV و ۵۰ KeV و دزهای متفاوت از 10^{10} تا 10^{12} اتم/cm² قرار گرفتند. در تمام مدت تابش، کریستال‌های سیلیکون در دمای نیتروژن مایع (LN2) و هلیوم مایع (LHe) قرار گرفته بودند. ضخامت نمونه‌ها برای انجام مشاهدات میکروسکوپی ابتدا بوسیله صیقل مکانیکی ب ضخامت ۱۰ میکرومتر و سپس با صیقل آرگون ب ضخامت $100 \text{ \AA}$ کاهش داده شدند. میکروسکوپ مورد استفاده از نوع JEOL ۲۰۰ CX میباشد که در ولتاژ ۲۰۰ کیلو الکترون ولت کار کرده و دارای قدرت تفکیک (lattice resolution) $1/4 \text{ \AA}$ میباشد.

یافته‌ها و بررسی آنها

شکل ۱ تصویر الکترونی نواحی برخوردانی است که با کاشت یون‌های بیسموت با انرژی ۱۰۰ KeV و با دزی برابر با 10^{12} اتم/cm² ایجاد شده است. در این آزمایش زاویه بین یون‌های کاشت و جهت صفحات کریستال (۱۱۰) برابر 7° بوده است و این برخوردها بصورت نقاط سیاه رنگ در شکل ۱ مشاهده میشوند. اندازه این نواحی در حدود $40 \text{ \AA}$ میباشد و تعداد این نواحی در حدود 5×10^{11} اتم/cm² میباشد. تعداد این نواحی برای نمونه‌هایی که در جهت کریستالی (110) کاشت شده‌اند ده برابر کمتر از جهت‌های غیرکانالی آنها میباشد.

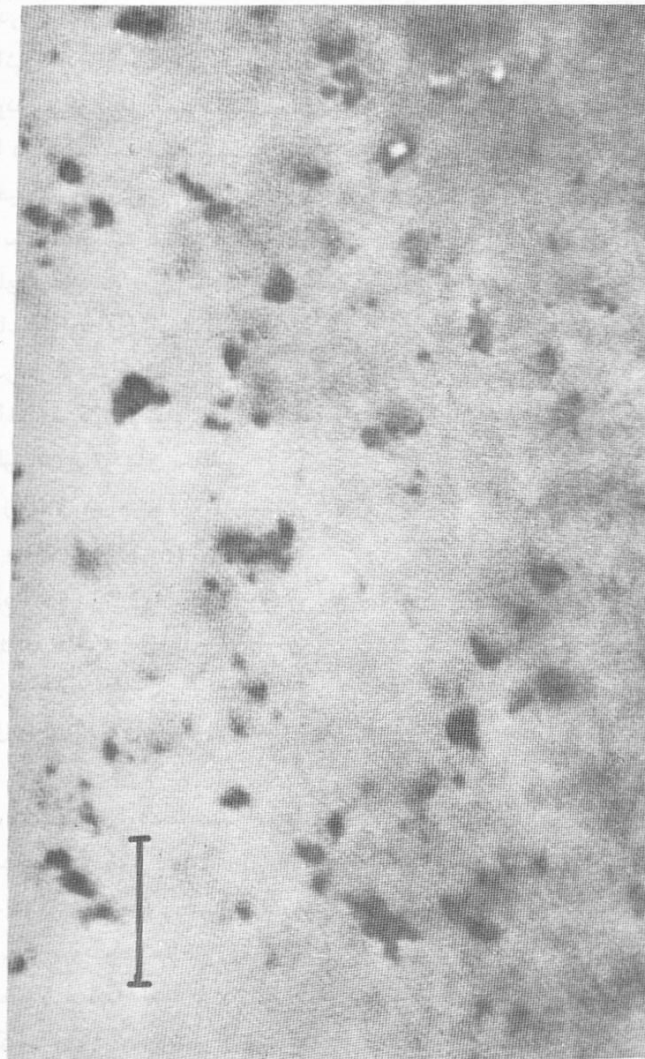
شکل ۲ نماینده یک تصویر الکترونی با قدرت تفکیک زیاد میباشد که نواحی آمرف را نشان میدهد. در این تصویر زنجیره اتم‌هایی که در جهت (110) میباشد نشان داده شده‌اند. این زنجیره‌های اتمی که هر نقطه آن تصویر دواتم مجاور سیلیکون میباشد در تمام تصویر بصورت مرتب در دنباله هم دیده

ev ۱۲ یا بعبارت دیگر $6 \times 10^{23} \text{ eV/cm}^3$ لازم را بجا بگذارند. اتصال این نواحی جابجائی نهائیتاً باعث آمرف شدن یک کریستال میشود.

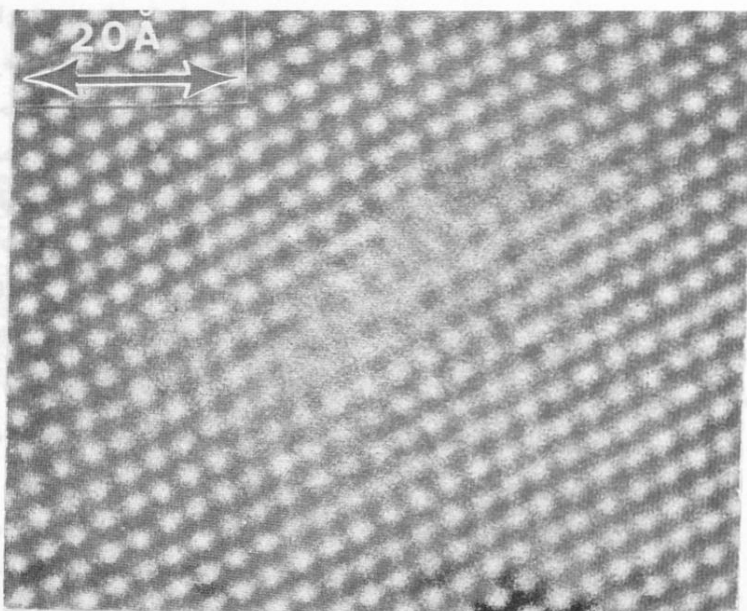
کشت یونی یکی از مهمترین مراحل در تولید وسایل الکترونیک در صنعت میکروالکترونیک میباشد. اصولاً کشت یونهای که دارای یک انرژی ثابت میباشد در یک نمونه غیرکریستال آمرف باعث پخش گوسی از آنها در ماده کشت شده میشود. در کریستالها مقدار تخریب و این توزیع بستگی زیادی به جهت یونهای تابشی نسبت به محور صفحات و شبکه اتمی و کانالهای موجود در بین اتمها دارد. بنابراین در موقع کاشت زاویهای برای ورود یونها باین کانالها باید در نظر گرفت که این زاویه به بار اتمی Z_1 یونهای کاشت شده، بار اتمی Z_2 ماده مورد کاشت و همینطور انرژی یونهای تابشی (E) بستگی دارد (۲). زاویهای که تحت آن یونها در طول کانالها جریان پیدا میکنند (channeling) بوسیله رابطه $\phi \propto (Z_1, Z_2/E)^{1/2}$ داده میشود. در صورتیکه زاویه ورودی برای یونهای تابشی کوچکتر از این مقدار باشد، پخش با آنچه در ساختمان آمرف اتفاق میافتد فرق زیادی خواهد داشت.

این نوع اطلاعات که بستگی زاویه با جنس یونهای تابشی و مقدار تخریب (damage) در کریستالها را میدهد در تعیین محل و خواص مرز P-N بوسیله کشت بکار میرود و در ساختن وسایل نیمه هادی بسیار مهم و لازم میباشد. در این مقاله مشاهداتی بوسیله میکروسکوپ الکترونی از نوع عبوری (T.E.M) انجام شده و ساختمان اتمی نواحی برخورد مورد مطالعه قرار گرفته است. اثرات کاشت یونی بطور نظری و تجربی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج کانالیزه شدن در پخش یونها و اثر تخریب آنها نشان داده شده است.

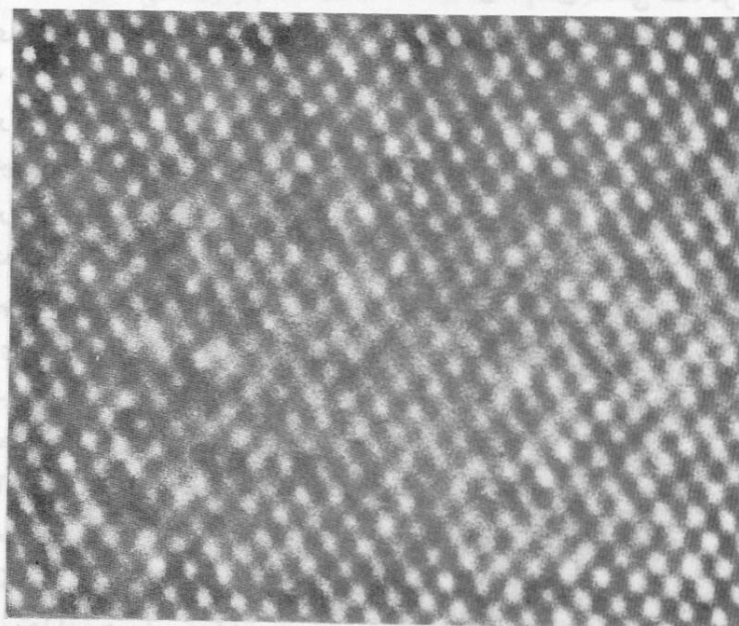
داریوش فتحی و احمد رشیدی نیا . ساختمان اتمی کریستال کشت شده .



شکل ۱- تصویر الکترون های عبوری از نمونه کشت شده بوسیله یون های بیسموت



الف



ب

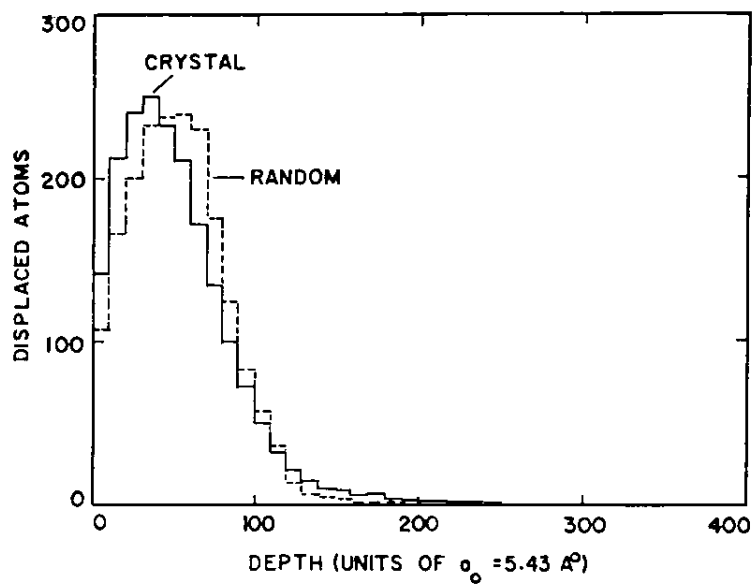
شکل ۲ (الف و ب) - تصویر الکترونی با قدرت تفکیک زیاد از نواحی آمرف شده.

میشوند ، باستثنای قسمت‌هایی که این نظم در اثر برخورد از بین رفته است . در این شکل ، یک ناحیه بزرگتری به همین حالت نشان داده شده است . همانطوریکه مشاهده میشود نظم رشته‌های اتمی در مجاورت این ناحیه تا اندازه‌ای از بین رفته و عدم وضوح تصویر در این نواحی باین علت میباشد . در قسمت زیر محاسبات این تخریب که بوسیله برنامه مارلو (Marlowe) بدست آمده (۳) ، داده میشود که در آن جهت تابش نسبت به صفحات کریستالی و اثرات آن در روی مقدار تخریب محاسبه شده است . استفاده از برنامه مارلو در محاسبات کاشت یونی برای محاسبه عمق نفوذ و انرژی یون‌ها در عمق‌های مختلف بسیار متداول است . نتایج نشان میدهد که در جهات کانالی مقدار قله (peak) میزان خرابی کم و انتگرال انرژی داده شده بماده کم شده است و یک تغییر بزرگ در جهت ازدیاد عمق کاشت بوجود آمده است . کانالی شدن یون‌ها با کم شدن انرژی آنها بیشتر میشود و زاویه حد این کانال‌ها با کم شدن انرژی بزرگتر میشود .

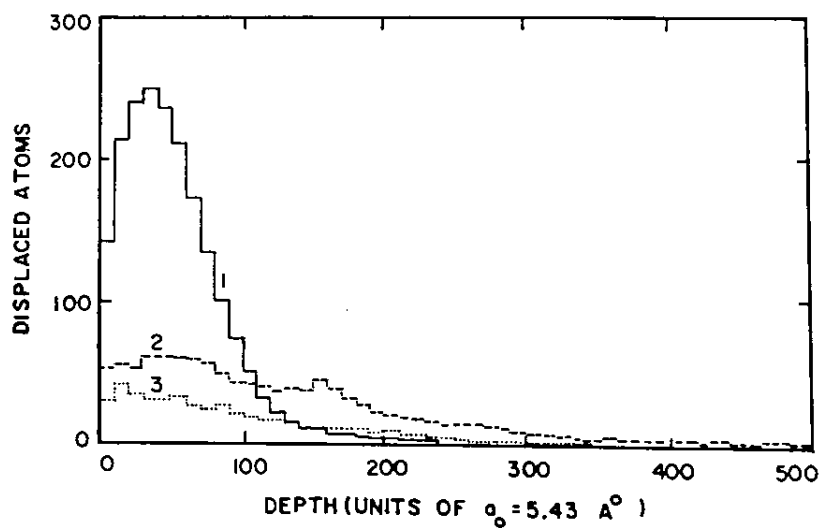
از آنجائی که در صنعت تولید دستگاه الکترونیکی از انرژی‌های کم برای تولید سطح‌های مرز P-N نزدیک بسطح نمونه باید استفاده شود ، مطالعه این اثر در ایجاد خرابی و عمق بسیار مهم است . در برنامه مارلو که برای برخوردهای اتمی طرح شده برخورد الاستیک در نظر گرفته شده است و تغییر مکان و حرکت یون‌ها طبق محاسبه لیندهارد کانالی (Lindhard) در آن گنجانیده شده است (۴) . در سیلیکون اغلب اعمال جابجائی اتم بوسیله برخوردهای الاستیک صورت میگیرد و این برخوردها دنبال میشوند تا یون‌ها انرژی خود را از دست بدهند . در این برنامه انرژی یون‌های بیسموت در هر برخورد در نظر گرفته شده و دنبال میشوند تا بحالت سکون در آیند . بعلاوه هر اتم سیلیکون در

صورتیکه انرژی بیشتر از انرژی لازم $E_d(12\text{ eV})$ است دریافت کند بوسیله برنامه دنبال شده تا انرژی آن به زیر 12 eV برسد . در شکل ۳ تعداد اتم‌های جابجا شده بصورت تابعی از عمق برای اتم‌های بیسموت با انرژی 100 KeV داده شده و مقایسه‌ای بین اتم‌هایی که بیک مانع کریستالی و یک مانع آمرف خورده‌اند نمایانده شده است . برای اینکه اثرات کانالی شدن یون‌ها مینیمم باشد زاویه بزرگتر از حد (یعنی 7° درجه) نسبت به عمود صفحات (110) سطح کریستال انتخاب میگردد . مقدار زاویه حدی که از رابطه نظریه کانالی لیندهارد بدست میآید برای این جهت $4/5^\circ$ درجه میباشد . توافق دو منحنی در شکل ۳ با تقریب خوبی میباشد و منحنی اتم‌های جابجا شده بخوبی با حدود ۲٪ برابری دارند . در دنباله منحنی اختلاف کمی وجود دارد که نمایانگر تعدادی اتم‌های کانالی شده در کریستال در عمق‌های زیادتر از معمول میباشد . شکل ۴ نشان میدهد که چطور تعداد اتم‌های جابجا شده بیسموت به جهت تابش آن در یک کریستال بستگی دارد .

منحنی ۱ شکل ۴ مشابه منحنی ارائه شده در شکل ۳ میباشد که در آن زاویه $\theta = 7^\circ$ میباشد این زاویه همانطوریکه قبلاً گفته شد بیشتر از زاویه حد در نظر گرفته شده است . در سه منحنی داده شده زاویه پولار (نسبت به محور 110) طوری انتخاب شده که خواص کانالی شدن را بخوبی مقایسه کنند . در منحنی ۲ ، زاویه $\theta = 3^\circ$ و $\phi = 15^\circ$ و در منحنی ۳ ، زاویه $\theta = 0^\circ$ و $\phi = 0^\circ$ انتخاب شده است . زاویه ϕ مقدار انعکاس از محورهای اصلی دیگر را مشخص میکند و از سطح (110) اندازه‌گیری شده است . در اینجا زاویه پخش اشعه $5/25^\circ$ میباشد . با مقایسه دو منحنی ۲ و ۳ همانطوریکه مشاهده میشود حرکت کانالی یونهای تابشی مقدار تخریب را بسیار کم میکند . این اثرات بر روی منحنی تخریب بر دو نوع میباشد : اول



شکل ۳- اختلاف عمق نفوذ و تعداد اتم‌های جابجا شده برای دو حالت پراکنده (random) و کریستالی که تحت زاویه 7° درجه کشت شده است.



شکل ۴- منحنی اتم‌های جابجا شده بر حسب زاویه‌های تابش (واحد عمق $\alpha = 5/43 \text{ Å}^\circ$)

شده است که در آن تعداد اتمهای جابجا شده و میانگین عمق نفوذی یونها برحسب زاویه تابشی آنها نشان داده شده است .

همانطوریکه از این جدول نتیجه گیری میشود، موقعیکه یونها در کانال حرکت میکنند تعداد اتمهای جابجا شده به ۲۵٪ کاهش پیدا میکند . در صورتیکه عمق متوسط نفوذی ۶ برابر میشود برای تغییر زاویه‌هایی بین 0° - 2° مقدار ماکزیمم تخریب ده برابر کوچکتر میشود .

نتیجه‌گیری

بوسیله استفاده از میکروسکوپ الکترونی T.E.M میتوان تصویری از تغییر مکانهای متوالی که تولید نواحی آمرف و نهایتا " کریستالی را به ماده آمرف تبدیل میکنند مشاهده کرد که نتایج فوق اهمیت کنترل روی جهت یونهای کاشت را برای دقت عمل در تولید سطح کاشت در مدارهای الکترونیکی نشان میدهد .

کم شدن مقدار قله یا ماکزیمم منحنی تخریب و دوم بیشتر شدن عمق ماکزیمم منحنی .

بر ایجاد تخریب در موقعیکه یونها در کانالها حرکت میکنند چند دلیل وجود دارد .

۱- تعدادی از یونها به علت برخورد با اتمهای سطحی در کانال قرار نمیگیرند ، ۲- بعضی از یونها بوسیله ارتعاشات حرارتی قبل از اینکه بسکون در بیایند از کانالها خارج میشوند و ۳- در حالت‌هاییکه نسبت بین جرم یونی کاشت و جرم اتم نمونه زیاد است ممکن است بدون آنکه یون از مسیر حرکتی خود خارج شود تغییر مکانهایی انجام بشود . بعنوان مثال برای یونهای بیسموت با انرژی ۱۰ KeV در اثر از دست دادن انرژی برابر ۱۲ eV انرژی ، فقط پرتو تابشی تحت زاویه‌ای کمتر از 1° منحرف میشوند . باین صورت عمق نفوذی بیشتر از آنچه در یک نمونه آمرف پراکنده (random) بدست می‌آید بوجود می‌آید .

در جدول ۲ خلاصه‌ای از مطالب فوق‌الذکر درج

جدول ۲- تعداد اتمهای جابجا شده و میانگین عمق نفوذی یونها

انرژی برحسب (KeV)	جهت تابش یونها θ ϕ	زاویه پهنی پرتو	تعداد اتمهای جابجا شده	عمق نفوذی
۱۰۰	۰ ۷	۰	۱۹۵۴	۹۵۵
	۱۵ ۳	۲۵ ر	۱۱۲۹	۳۸۷۸
	۰ ۰	۵۰ ر	۴۹۱	۵۶۶۵
	زاویه نامشخص		۱۹۱۶	۴۵۳

References

1. I. Manning and G.P. Mueller, Comp. Phys. Commun. 1,85 (1974).
2. O.S. Oen and M.T. Robinson, App. Phys. Letters 2, 83 (1963).
3. M.T. Robinson, Phys. Rev. B27, 5347 (1983).
4. J. Lindhard, M. Scharff and H.E. Schiott, Selskab Mat. Physics. Medd. No. 14 33, (1963).

ATOMIC STRUCTURE OF ION-IMPLANTED SILICON AND CHANNELING EFFECTS

D. Fathy and A. Rashidinia
Materials Department
Atomic Energy Organization of Iran
Tehran-Iran

Abstract

We have investigated the atomic structures of collision cascades in Bi^+ -implanted silicon. The formation of subcascades or bunching of the primary cascades is clearly observed. The central regions of the cascades were found to be amorphous with a high density of disorder in the surrounding regions. The experimental results are discussed in terms of the computer simulation of the deposited damage energy profiles. The effect of channeling on the deposited damage energy profile is examined. The peak and integrated damage energies are considerably lower in channeling directions compared to random directions.