



# Research on Ion Distribution and Stopping Power for Au Ions Irradiation Si, SiC

Yecheng Gao<sup>1,2,3,\*</sup>, Jiangcheng Cao<sup>1,2,3</sup>, Hongtao Man<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of High-End Server & Storage Technology, Jinan, China

<sup>2</sup>Shandong Inspur Artificial Intelligence Research Institute Co., Ltd, Jinan, China

<sup>3</sup>Inspur Electronic Information Industry Co., Ltd, Jinan, China

## Email address:

gaoyecheng@inspur.com (Yecheng Gao), caojch@inspur.com (Jiangcheng Cao), manht@inspur.com (Hongtao Man)

\*Corresponding author

## To cite this article:

Yecheng Gao, Jiangcheng Cao, Hongtao Man. Research on Ion Distribution and Stopping Power for Au Ions Irradiation Si, SiC. *American Journal of Life Sciences*. Vol. 10, No. 2, 2022, pp. 76-81. doi: 10.11648/j.sd.20221002.20

Received: March 19, 2022; Accepted: April 19, 2022; Published: April 28, 2022

**Abstract:** In order to predict the effect of heavy ion irradiation more accurately, the ion distribution and stopping power of Au irradiated silicon (Si) and silicon carbide (SiC) under various energy conditions were calculated by using SRIM program, and compared with the experimental values. It was found that the projected range and divergence predicted by SRIM were significantly smaller, and the stopping power was significantly larger by about 25%. Therefore, the method of reducing the target density parameters was tried to make corrections. It was found that the gold ion distribution became deeper after the density decreased, the stopping power became smaller, and the curve was closer to the experiment with an error of only ~5%. The density reduction coefficient is introduced since there is no definite conclusion on how much density decreases. Based on a large number of previous experimental data, SRIM was used to calculate the density reduction coefficient values under different energy conditions repeatedly, and found that there is a corresponding relationship between the values and energy values. Finally, the polynomial regression fitting method was used to obtain their functional expressions, which laid a foundation for the prediction of Si and SiC irradiated by heavy ions.

**Keywords:** SRIM, Ion Irradiation, Au Ion Distribution, Stopping Power

## Au辐照Si, SiC的分布和阻止功率的研究

高业成<sup>1,2,3,\*</sup>, 曹江城<sup>1,2,3</sup>, 满宏涛<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>高效能服务器和存储技术国家重点实验室, 济南, 中国

<sup>2</sup>浪潮人工智能研究院, 济南, 中国

<sup>3</sup>浪潮电子信息产业股份有限公司, 济南, 中国

## 邮箱

gaoyecheng@inspur.com (高业成), caojch@inspur.com (曹江城), manht@inspur.com (满宏涛)

**摘要:** 为了更准确地预测重离子辐照效应的结果, 使用SRIM程序, 分别对各种能量条件下金(Au)辐照硅(Si), 碳化硅(SiC)的离子分布和阻止功率进行了大量计算, 并与实验值进行对比。发现SRIM预测的投影射程和歧离度明显偏小, 阻止功率明显偏大25%左右, 于是尝试降低靶密度参数的方法进行修正, 发现密度降低后金离子分布变深, 阻止功率变小, 曲线更贴近实验, 误差仅5%。密度降低多少尚无定论, 便引入了密度降低系数这一物理量。基于大量的前人实验数据, 使用SRIM反复试算得出不同能量条件下的密度降低系数值, 发现其与能量值存在对应关系, 最后使用多项式回归拟合的方法得到了它们的函数表达式, 为之后预测重离子辐照Si和SiC奠定了基础。

**关键词:** SRIM, 离子辐照, 金离子分布, 阻止功率

## 1. 引言

作为电子器件中的重要材料,硅和碳化硅经常通过离子注入改变性质。离子注入是选择性引入掺杂剂以改变电子特性的关键技术。重离子金具有较高的损伤比率,常被用于模拟极端核辐射环境下的损伤演化,还有产生显著位移损伤的能力,在合理的时间内每个原子可产生几百个位移,因此常用于模拟反应堆环境中 $\alpha$ 粒子反冲、裂变产物或自离子对材料的损伤。碳化硅具有优异的电性能、良好的导热性和较高的击穿电压,是一种很有前途的高温、大功率、高频电子器件的候选材料[1]。硅有无定形硅和晶体硅两种同素异形体,高纯的单晶硅是重要的半导体材料。关于碳化硅,单质硅等轻物质中极重离子的电子阻止能力的数据非常有限,理论预测尚未得到实验验证。

物质中离子的停止和范围(SRIM)软件利用经验尺度方法来预测材料中离子注入的停止能力和范围[2]。它是迄今为止离子辐照领域内应用最为广阔,界面最友好的软件。SRIM 通常对轻离子的辐照效应估计很有效,如H, P, N[3]。然而,对于含有轻元素的化合物及单质靶中,重离子的损伤谱和离子分布存在很大的差异。偏差最大的是非常重的离子如Au, Pt[4,5]。主要原因是对于轻离子,SRIM预测的电子阻止功率在实验数据的10%以内,但其严重高估了慢速重离子(<25 keV/nucleon)的阻止能力。这是此软件各版本一直未修复的主要问题。尽管有些代码对此进行了改良,如SDTrimSP, TRIDYN[6], IM3D[7]等,但它们只是一些简单的代码,没有封装成.exe后缀的可执行程序,没有交互界面,操作起来比较困难。所以尝试修改SRIM参数来修正其计算结果是一种简单快速的方法。

虽然轻离子的电子阻止功率已经被广泛地测量和验证,但在中低能量范围内测量重离子的电子阻止能力,特别是对非常重离子(如金离子)的电子阻止能力一直是一个长期的挑战。离子分布和精确阻止能力是预测辐照损伤演化行为的必要信息。能在纳米尺度精确测量待测样品的浓度分布并非易事,测量的结果也存在一定误差。一般使用二次离子质谱仪,卢瑟福背散射仪等精确测量。但相关的准确实验值非常缺乏,难以判断SRIM对电子阻止的高估究竟有多大。

本文结合前人对Au离子辐照的研究,使用SRIM对Au辐照Si和SiC的离子分布和阻止功率进行了深入研究,并与已有的实验值进行对比。验证了降低密度修正SRIM预测值的可行性。并且对密度修正系数进行了深入研究,发现了其与能量的规律,并通过多项式回归拟合的方法得到了函数关系,为后续研究重金属离子注入Si和SiC奠定了基础。

## 2. 模拟及分析方法

根据LSS理论,对于非晶态靶物质来说,一个入射离子在靶内单位距离上的能量损失可以表示为

$$-\frac{dE}{dR} = N[S_n(E) + S_e(E)] \quad (1)$$

式中, $N$ 为靶原子数密度,单位 $\text{cm}^{-3}$ ;  $E$ 为能量,单位eV;  $S_n(E)$ 为核阻止,单位 $\text{eV}/\text{\AA}$ ;  $S_e(E)$ 是电子阻止,单位同为 $\text{eV}/\text{\AA}$ 。

那么总距离 $R$ 为每段路程的总和:

$$R = \int_0^{R_0} dR = \frac{1}{N} \int_0^{E_0} dE / [S_n(E) + S_e(E)] \quad (2)$$

式中,距离 $R$ 为平均总射程。

$$S_n(E) = \frac{-1}{N} \frac{dE_n}{dR} \quad (3)$$

$$S_e(E) = \frac{-1}{N} \frac{dE_e}{dR} \quad (4)$$

众所周知,SRIM计算的重离子入射轻靶的电子阻止功率偏大,于是P. Sigmund[8]提出互易法修正其计算的电子阻止,对于SiC和Si

$$S_{e,Au \text{ in SiC}}(E) = \frac{1}{2} S_{e,Si \text{ in Au}}(E) + \frac{1}{2} S_{e,C \text{ in Au}}(E) \quad (5)$$

$$S_{e,Au \text{ in Si}}(E) = S_{e,Si \text{ in Au}}(E) \quad (6)$$

SRIM对离子辐照效应的计算基于蒙特卡洛法。所以计算总离子数越多,结果越精确。模拟细节设置如下:使用“the Stopping Range Tables”程序计算电子阻止功率和核阻止功率。使用TRIM中的“Detailed Calculation with Full Damage Cascades”选项来计算离子分布、投影射程、损伤剖面[9]。

对于碳化硅靶材:对SiC中3个 MeV  $\text{Au}^+$ 进行了全级联Trim模拟(密度为 $3.21 \text{ g/cm}^3$ )。Si和C的阈值位移能量分别设置为35 eV和20 eV[9]。对于硅靶,不同方法制备的硅密度可能不同,位移结合能也可能不同,因此本仿真采用默认值20 eV[9]。为了纠正SRIM对电子阻止功率的过高估计,提出了密度校正系数的概念

$$k = \frac{\rho_{\text{original}}}{\rho_{\text{calculate}}} \quad (7)$$

$\rho_{\text{original}}$ 是靶的初始密度,单位 $\text{g/cm}^3$ ;  $\rho_{\text{calculate}}$ 是SRIM程序的输入参数,单位 $\text{g/cm}^3$ 。它不代表靶的实际密度,仅用来修正SRIM的计算误差。

结合前人的射程实验数据,使用TRIM计算了不同能量下Au辐照SiC和Si靶的 $R_p$ 和 $\Delta R_p$ 。然后通过降低靶密度参数的方法修正TRIM的计算结果,反复试算求得合适的密度修正系数 $k$ 。分析密度修正系数 $k$ 与能量 $E$ 的关系,发现 $k$

与 $E$ 存在函数对应关系,通过多项式拟合求得了拟合方程,拟合效果良好。

TRIM程序可以任意修改密度参数值,但无法根据实验射程直接找到合适的密度修正系数 $k$ ,只能反复假设某一值,然后计算得到结果并于实验比较。这一过程往往消耗大量的精力和时间。本文推荐快速寻找 $k$ 的步骤如下:

- 1.取初始值 $k = 0.8$ ,得到 $\rho_{\text{calculate}}$ ,总离子数处填入1000,使用“Ion Distribution and Quick Calculation of Damage”选项计算,比较投影射程 $R_p$ 与实验值的大小。
- 2.如果相对误差  $> 5\%$ ,则根据经验调整 $k$ ,建议增大或缩小0.05,再次计算,直至相对误差  $< 5\%$ 。
- 3.损伤类型更改为“Ion Distribution and Quick Calculation of Damage”选项,总离子数建议不小于49999,计算,比较投影射程 $R_p$ 与实验的大小。
- 4.如果相对误差  $> 1\%$ ,则继续调整 $k$ 与 $\rho_{\text{calculate}}$ ,建议每次增大或缩小0.01,继续计算多次,当差距很小时,建议每次增大或减小0.005,并开启多个窗口同时运算,直到相对误差  $< 1\%$ ,记录 $k$ ,结束。

### 3. 结果与讨论

#### 3.1. 金辐照碳化硅

对于碳化硅的实验研究较多。Zhang 等人使用 RBS, SIMS, TEM 深入研究了不同能量下金辐照碳化硅的靶损伤和离子分布[4]。金离子以 700keV 能量在 295K 以  $2.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  剂量辐照碳化硅,结果如图 1。SRIM 预测的射程  $R_p$  明显小于测量值 190nm。修正靶密度为标准值 66%的情况下,射程接近 190nm。测量的歧离度  $\Delta R_p$  过大,可能由于剂量小,能量小,其测量精度差。

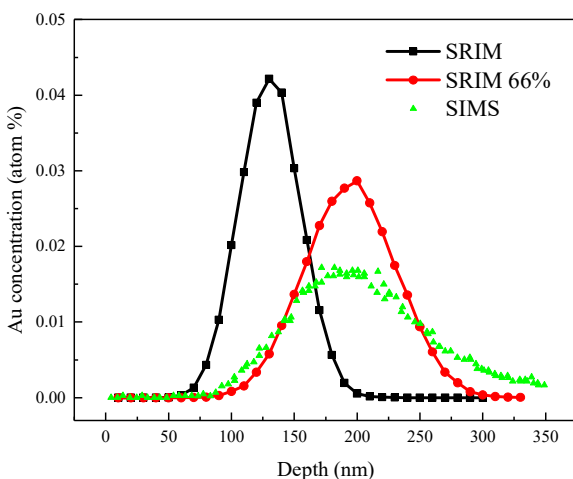


图1 在295K, 700keV下SRIM测量金离子辐照SiC的分布曲线。

在同样入射条件下SRIM测量金离子辐照SiC的靶损伤分布结果如图2所示。可见,SRIM预测的靶损伤深度明显小于SIMS测量值,dpa曲线形状也有较大差异。修正靶密度为标准值66%的预测曲线形状更接近测量值,且靶损伤深度峰值在150nm附近,也逼近SIMS测量的峰值140nm。

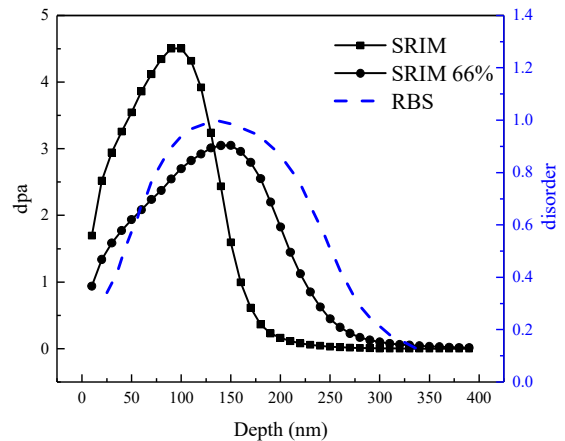


图2 在295K, 700keV下SRIM、SRIM修正密度66%后和RBS<sup>[5]</sup>测量金离子辐照SiC的分布曲线。

综合考虑Au离子分布和靶的损伤分布,适当降低靶的密度可使SRIM预测值更符合测量值,大大降低模拟误差。但降低多少往往需要根据经验判断。

对于一定角度注入的情况,SRIM预测值仍然明显小于测量值。K. Jin等人[1]测量了Au在室温15MeV 60°辐照SiC,模拟值和测量值如图3所示。用二次离子质谱仪测得的金离子分布明显比背散射法测得的金离子分布要深,主要原因是高剂量重离子辐照下SiC的体积膨胀。RBS测量时,深度基与靶的标准密度从 $\text{at}/\text{cm}^2$ 向 $\text{nm}$ 单位转换,对结果一般无太大影响,但SIMS的深度测量以实际密度为基础,所以体积膨胀会导致其最终结果的横坐标偏大。K. Jin等人发现待测样品边缘区域的体积膨胀明显小于中心区域,边缘区域的SIMS结果也更加准确。所以使用SIMS测量高剂量离子注入的样品时,必须修正体积膨胀的影响。有些学者通过降低SRIM模拟的靶密度参数值来匹配模拟值和实验值,这会导致与其他仪器的测量结果产生较大差异,故建议按一定比例缩小SIMS结果的横坐标值。在60°倾斜角辐照下,SRIM预测值也明显小于测量值,通过降低靶密度的方法修正后,其浓度分布曲线很接近测量的结果。其他能量如12MeV, 60°条件下的研究结果与此相近,不再赘述。总之,SRIM降低靶密度的修正方法在倾斜注入时依然适用。

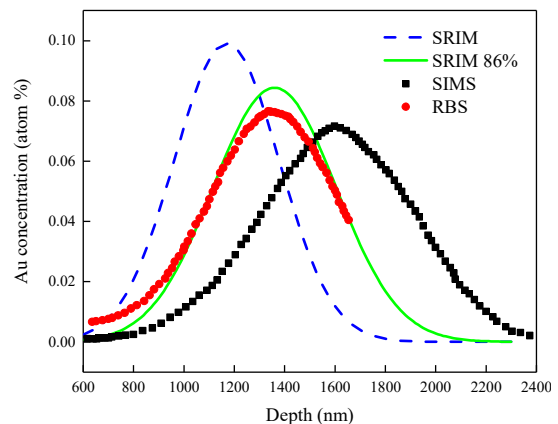


图3 离子注入角度60度下SRIM, SIMS修正后, RBS金离子辐照SiC的分布曲线。

测量结果与注入Au分布的SRIM模拟结果之间的差异可能是Trim程序中使用的电子阻止功率估计过高。可靠的电子停止功率的实验数据很少, 且Zhang[10]和K. Jin[11]的实测值相差较大。

图4分别展示了他们的实验值及SRIM预测电子阻止功率。上述分析可见, SRIM预测的射程偏小, 所以电子阻止功率理论上是偏高的, 文献[10]可能更准确。张勇给出的电子阻止功率曲线是由互易法(能量< 5keV/u)、实测值(30~70keV/u)和平滑外推(5~30keV/u)三部分组成的。在接近0keV/u时, 预测值与SRIM值的差值很小, 然后迅速增大, 在10keV/u左右逐渐减小, 在65keV/u时差值几乎为0。

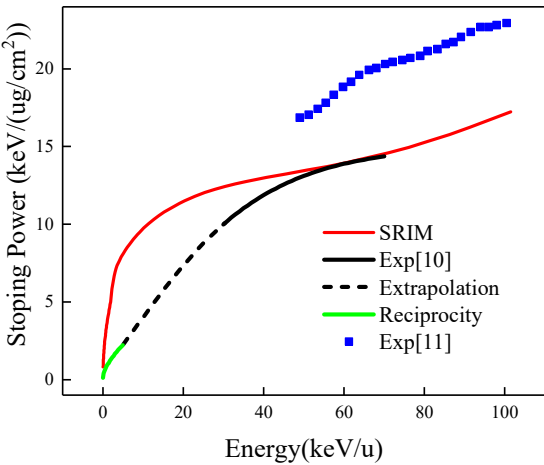


图4 SiC中Au离子的电子阻止功率。

表1展示了通过实验测量和TRIM预测的范围参数。TRIM预测的投影射程和歧离度显著小于实验值, 于是降低靶密度参数来修正计算结果。通过大量的反复试算终于使得 $R_p$ 预测值与实验值相对偏差小于1%, 同时得到了密度修正系数 $k$ 。另外,  $\Delta R_p$ 仍然略小于实验值, 可能与测量仪器(RBS, SIMS等)的深度分辨率不足有关, 毕竟在纳米尺度上精确测量薄膜中少量杂质的浓度有一定挑战。

表1 Au离子注入SiC的射程参数[1,12]。

Energy keV	Experiment		TRIM		TRIM modified		$k$
	$R_p$ (nm)	$\Delta R_p$ (nm)	$R_p$ (nm)	$\Delta R_p$ (nm)	$R_p$ (nm)	$\Delta R_p$ (nm)	
20	15	3	13.1	2.2	15	2.6	0.86
30	17.5	4	16	2.8	17.5	3.1	0.92
50	24	5	21.1	3.9	24	4.5	0.87
70	29	7	25.5	4.8	29	5.5	0.875
100	39	8	31.7	6.1	39	7.6	0.807
250	71	15	58.3	11.5	71	13.9	0.817
700	190	--	125.9	23.6	190.1	35.9	0.66
1000	250	--	168.5	30.6	250.2	45.7	0.671
2000	420	--	311.2	52.9	420.7	72	0.739
5000	1030	--	758	110.5	1031	150	0.735
7000	1390	--	1069	144	1395	189	0.765
10000	1930	--	1540	189	1930	237	0.8
12000	2300	--	1860	219	2300	268	0.81
15000	2750	--	2350	253	2750	297	0.855

$k$ 与能量 $E$ 的关系如图5所示。在注入离子能量为20~250keV时,  $k$ 有下降趋势; 注入离子能量为700~15000keV时,  $k$ 呈上升趋势。但是注入离子能量在250~700keV范围的实验数据缺乏, 无法推断与密度修正系数 $k$ 的关系。将电子阻止功率实验值除以SRIM计算值得比绘制在同一横坐标内发现, 系数 $k$ 先下降后上升的趋势与电子阻止比值的趋势相近。表明SRIM计算的电子阻止偏差越大, 射程计算越不准确, 需要修正密度参数的程度也越大。电子阻止比值的变化规律一定程度上验证了修正系数 $k$ 的准确性。

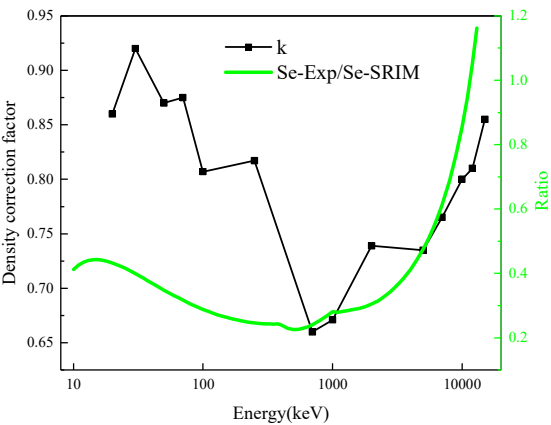


图5 密度修正系数 $k$ 和注入离子能量的关系及电子阻止的比值。

使用四次多项式拟合求得 $k$ 与能量 $E$ 的对数的多项式拟合回归方程为

$$\begin{cases} k_{SiC} = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 \\ x = \log(E) \end{cases} \quad (8)$$

由于实验数据不充足, 缺少250keV~700keV, >700keV的值, 结果存在一定偶然性。表达式中各参数值如表2。拟合结果见图6。两条曲线的拟合效果均良好。拟合结果与实验值的准确性关系很大。根据方程式[9], 即可确定某一能量下的修正系数  $k$ , 再乘以靶密度, 即得到SRIM输入密度值, 从而得到准确的离子分布和靶损伤分布。这是一种非常简单快速的修正SRIM的方法。

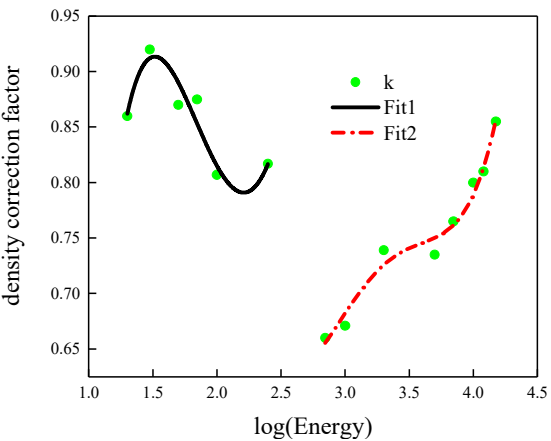


图6 密度修正系数 $k$ 的拟合结果。



表2 密度修正系数 $k_{SiC}$  的拟合参数。

parameter	20<E<250	700<E<15000
$a_0$	-6.11317	27.04778
$a_1$	13.41511	-33.455
$a_2$	-9.08054	15.66375
$a_3$	2.53573	-3.21624
$a_4$	-0.24161	0.24524

3.2. 金辐照硅

目前,对于硅的实验研究极少。一般而言,重离子注入轻靶时,SRIM计算的射程 $R_p$ 和歧离度 $\Delta R_p$ 会明显小于实验值。 $Au^+$  400keV垂直注入Si<100>靶(密度2.321 g/cm<sup>3</sup>),剂量 $5\times 10^{15}$  ions/cm<sup>2</sup>,不同密度的SRIM预测结果如图7所示。可见,计算的Au分布曲线明显偏离实验值,但密度参数修正为原来的80%(即1.74 g/cm<sup>3</sup>)时,其分布曲线与实验值吻合良好。降低密度参数后, $R_p$ 和 $\Delta R_p$ 更大,峰值浓度也降低,可以用来计算重离子Au分布,尽管半峰宽略小于实验值。

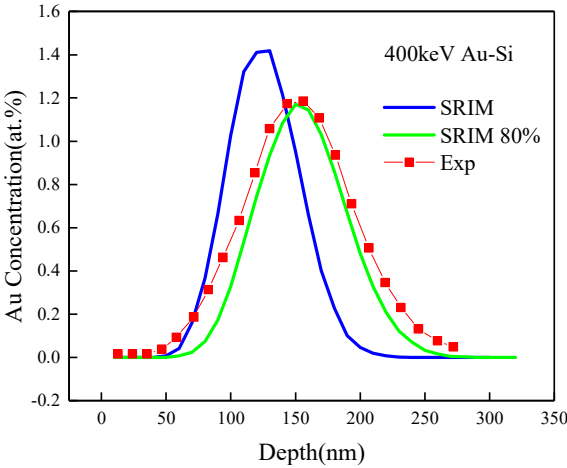


图7 SRIM模拟和实验[13]测得的硅中的金分布。

测量结果与注入Au分布的SRIM模拟结果之间的差异可能是Trim程序中使用的电子阻止功率估计过高。由于阻止功率的相关准确实验数据极少,使用Sigmund[8]提出的互易原理对电子阻止功率进行估计。用互易法和SRIM程序计算了Au在Si的电子停止截面,如图7所示。

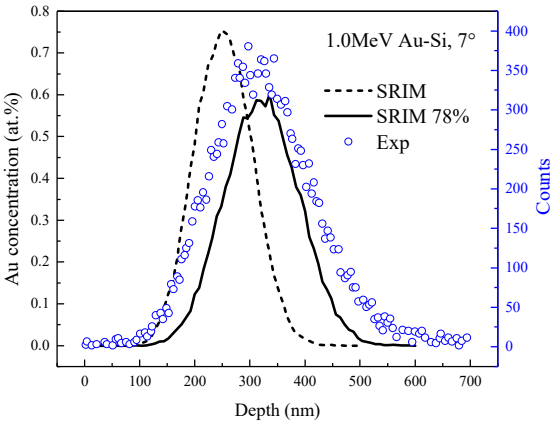


图8 实验[14]和SRIM预测的1.0 MeV Au+注入硅单晶的深度分布。

图8显示了实验[14]和SRIM预测的1.0 MeV Au+注入硅单晶的深度分布。当校正密度为78% (1.81g /cm<sup>3</sup>)时,SRIM计算的投影范围小于实验值,但318 nm的投影范围与RBS值319.8 nm一致。但此实验值没有进行定量分析,所以无法比较浓度的准确性,但至少趋势是一致的。

图9为SRIM和互易法计算的阻止功率。可见,基于标准密度的SRIM预测值远高于基于互易方法的预测值。程序中的电子阻止数值无法自行输入或修改,但降低靶的密度参数可快速补偿SRIM程序中电子阻止功率的高估。修改靶的密度为75%时,电子阻止功率仍然与互易法存在较大差异。但密度降低的同时还降低了核阻止功率,故其总阻止功率的计算结果比较接近互易法的值,但仍需要可靠的实验数据来验证。

表3展示了通过实验测量和TRIM预测的Au辐照不定形Si薄膜射程参数。TRIM预测的投影射程和歧离度显著小于实验值,于是降低靶密度参数来修正计算结果。通过大量的反复试算终于使得 $R_p$ 预测值与实验值相对偏差小于1%,同时得到了密度修正系数 $k$ 。

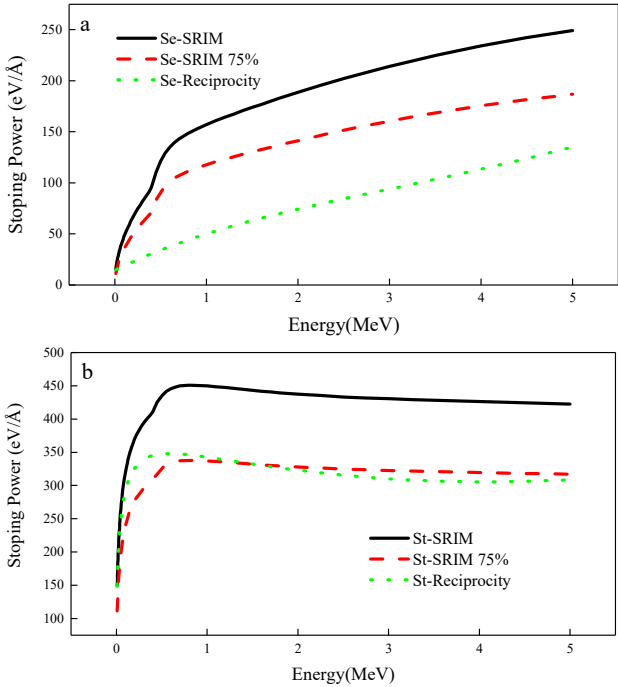


图9 互易法和基于标准密度和Si中Au离子75%密度的SRIM计算的阻止功率(a)电子阻止功率; (b)总阻止功率。

使用四次多项式拟合求得 $k$ 与能量 $E$ 的对数的多项式拟合回归方程为

$$k_{Si} = b_0 + b_1 E + b_2 E^2 + b_3 E^3 + b_4 E^4 \tag{9}$$

拟合结果如图10所示。四次多项式拟合回归参数见表4。拟合的相关系数 $R^2=0.96614$ ,残差平方和0.00102,表明拟合效果良好,可表达式可用于密度修正系数 $k$ 的预测。

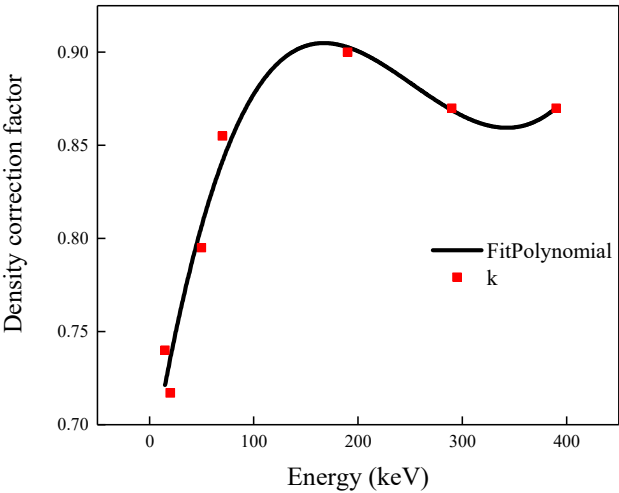


图10 能量和密度修正系数的拟合关系图。

表3 Au离子注入Si的射程参数[12]。

Energy keV	Experiment		TRIM		TRIM modified		k
	$R_p$ (nm)	$\Delta R_p$ (nm)	$R_p$ (nm)	$\Delta R_p$ (nm)	$R_p$ (nm)	$\Delta R_p$ (nm)	
15	21	5	15.8	3.1	21	4.3	0.74
20	25	5.4	18.3	3.7	25	5.2	0.717
50	37.5	8.4	30	6.5	37.6	8.2	0.795
70	42.8	10.3	36.7	8.1	42.7	9.5	0.855
190	78.2	19.8	70	16	78.1	17.7	0.9
290	110	29	95	21.5	109.3	24.6	0.87
390	136.6	33.5	119	26.5	136.2	30.6	0.87

表4 密度修正系数 $k_{Si}$ 的拟合参数。

parameter	k
$b_0$	0.6739
$b_1$	3.4000E-03
$b_2$	-1.6111E-05
$b_3$	2.5617E-08
$b_4$	-8.5845E-12

4. 结论

本文定义了密度修正系数 $k$ ，并参考大量的实验数据，使用TRIM反复试算，得到了不同能量条件下金离子辐照碳化硅，硅的 $k$ 值。然后通过多项式拟合的方法，求出了 $k$ 与能量 $E$ 的函数表达式。通过此式修正密度可使计算的射程误差由约25%降低为约5%。这对于SRIM准确预测轻元素靶中的重离子分布，阻止功率，能量损失，靶损伤情况，有重要意义。

还使用SRIM计算Au辐照SiC，Si电子阻止功率和总阻止功率，并与互易法，实验值作比较。发现密度修正后的电子阻止功率变小了，更接近真实值。这解释了降低密度参数后入射深度，靶损伤深度增大的原因。同时也验证了该方法的可行性。

以上结果表明，基于简化密度的SRIM预测是一种简单而可靠的方法，可以弥补SRIM代码中电子阻止功率的过高估计，并且可以准确的预测重离子分布和靶伤。准确地预测注入重离子在固体中的分布仍然是近几十年难以解决地问题，降低靶密度参数的方法可能使重离子注入半导体材料改性技术应用更为广泛。另外，从源代码层面更新或修改SRIM程序是一个非常有价值的研究方向。

参考文献

[1] JIN K, ZHANG Y, XUE H. Ion distribution and electronic stopping power for Au ions in silicon carbide [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2013, 307: 65-70.

[2] ZIEGLER J F, ZIEGLER M D, BIRSACK J P. SRIM – The stopping and range of ions in matter (2010)[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2010, 268 (11-12): 1818-1823.

[3] HOBLER G, BOURDELLE K K, AKATSU T. Random and channeling stopping power of H in Si below 100 keV [J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section B-Beam Interactions with Materials and Atoms, 2006, 242 (1-2): 617-619.

[4] ZHANG Y, BAE I T, SUN K. Damage profile and ion distribution of slow heavy ions in compounds [J]. Journal of Applied Physics, 2009, 105 (10): 104901.

[5] XUE H Z, ZHANG Y, ZHU Z. Damage profiles and ion distribution in Pt-irradiated SiC[C]/Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms: 286. 2012: 114-118.

[6] HOFSAESS H, ZHANG K, MUTZKE A. Simulation of ion beam sputtering with SDTrimSP, TRIDYN and SRIM [J]. Applied Surface Science, 2014, 310: 134-141.

[7] LI Y G, YANG Y, SHORT M P. IM3D: A parallel Monte Carlo code for efficient simulations of primary radiation displacements and damage in 3D geometry[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 18130.

[8] P. SIGMUND. Reciprocity in the electronic stopping of slow ions in matter [J]. European Physical Journal D, 2008, 47 (1): 45-54.

[9] WEBER W J, ZHANG Y. Predicting damage production in monoatomic and multi-elemental targets using stopping and range of ions in matter code: Challenges and recommendations[J]. Current Opinion in Solid State and Materials Science, 2019, 23 (4): 100757.

[10] JIN K, ZHANG Y, ZHU Z. Electronic stopping powers for heavy ions in SiC and SiO2 [J]. Journal of Applied Physics, 2014, 115: 044903-044903.

[11] ZHANG Y, WEBER W J, WANG C M. Electronic stopping powers in silicon carbide[J]. Physical Review B, 2004, 69 (20): 205201.

[12] Behar M, Fichtner P, Grande P, et al. Ranges in Si and Lighter Mono and Multielement Targets [J]. Materials Science & Engineering R-Reports, 1995, 15 (1-2): 1-83.

[13] MIKSOVA R, MACKOVA A, JAGEROVA A. Structural study and ion-beam channelling in Si < 1 0 0 > modified by Kr<sup>+</sup>, Ag<sup>+</sup>, Ag<sup>2+</sup> and Au<sup>+</sup>, Au<sup>2+</sup> ions [J]. Applied Surface Science, 2018, 458: 722-733.

[14] WANG K M, MENG M Q, LU F. Rutherford backscattering/channeling study of the implanted MeV Au<sup>+</sup> in silicon [J]. Materials Science and Engineering B-Solid State Materials for Advanced Technology, 1999, 57 (2): 92-96.