

# 低速 $^{84}\text{Kr}^{15+,17+}$ 离子轰击GaAs单晶\*

杨变<sup>1)2)</sup> 杨治虎<sup>1)†</sup> 徐秋梅<sup>1)</sup> 郭义盼<sup>1)2)</sup> 武晔虹<sup>1)2)</sup>  
宋张勇<sup>1)</sup> 蔡晓红<sup>1)</sup>

1) (中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

2) (中国科学院大学, 北京 100049)

(2013年9月18日收到; 2013年11月20日收到修改稿)

用345 keV的 $\text{Kr}^{15+}$ 和340 keV的 $\text{Kr}^{17+}$ 离子以 $45^\circ$ 角入射n型GaAs单晶(100)面, 测量了表面形貌的变化和发射的375—500 nm Ga I和Kr II的特征光谱线.  $\text{Kr}^{q+}$  ( $q = 15, 17$ )离子轰击后表面形貌的变化主要取决于入射离子的电荷态 $q$ . 离子沉积到靶表面的能量引起Ga原子激发, 其辐射光谱为Ga I 403.2 nm和Ga I 417.0 nm. 入射离子中性化过程中俘获GaAs导带电子形成高激发态原子, 通过级联退激填充3p, 4d等空穴, P壳层电子跃迁发射谱线为Kr II 410.0 nm, Kr II 430.4 nm, Kr II 434.0 nm和Kr II 486.0 nm, Kr II 486.0 nm为较强谱线. 实验结果表明, 入射离子与GaAs单晶相互作用发射的可见光产额与入射离子的电荷态密切相关, 较高电荷态 $\text{Kr}^{17+}$ 离子入射产生的光辐射产额大约为 $\text{Kr}^{15+}$ 离子的两倍.

**关键词:** 表面形貌, 光谱, 高激发态

**PACS:** 32.30.Jc, 34.80.Dp, 61.80.Jh

**DOI:** 10.7498/aps.63.053201

## 1 引言

GaAs单晶是直接带隙半导体材料, 禁带宽度大(室温下为1.43 eV), 有较高的发光效率, 其带隙位于红外光范围, 广泛应用于发光二极管、红外光源、半导体激光器等领域<sup>[1,2]</sup>. 载能离子束引起的注入、溅射等效应, 推进了GaAs辐照损伤和GaAs微波场效应管等器件的研究<sup>[2-7]</sup>.

高电荷态离子逼近金属或半导体表面过程中, 表面极化产生镜像电荷, 使入射离子获得能量增益<sup>[8,9]</sup>. 当入射离子与表面间的势垒低于费米面时, 金属或半导体表面的导带电子会大量共振转移到入射离子的高激发态, 形成高激发态的里德堡原子, 它可通过俄歇跃迁、X射线发射或可见光辐射等方式退激<sup>[9-13]</sup>. 入射离子进入靶表面后, 在约 $10^{-13}$  s时间尺度俘获大量电子而被屏蔽, 将势能沉积在表面 $1\text{ nm}^2$ 、几个原子层的空间尺度, 引起电子、离子及原子的溅射<sup>[2,9,12]</sup>, 以及X射线的发射

<sup>[14,15]</sup>. 当入射离子电荷态较低时, 表面附近被俘获电子的光辐射跃迁速率比自电离和俄歇跃迁的速率小约6个数量级<sup>[16]</sup>, 因此光辐射退激过程可以忽略. 文献<sup>[17-20]</sup>从实验上研究了单电荷态离子与金属表面相互作用的可见光发射. 低速单电荷态离子入射金属表面主要是俄歇中性化过程<sup>[21]</sup>. 高电荷态离子与表面相互作用的可见光谱主要有两种, 分别为靶原子、靶离子的光辐射和入射离子中性化过程中的跃迁光谱<sup>[22,23]</sup>. 目前, 高电荷态离子与固体相互作用的研究多集中于高里德堡态原子的电子和X射线发射的研究, 对于入射离子中性化过程中的可见光辐射实验研究很少. 入射离子与固体相互作用过程中形成的高里德堡原子的高激发态上电子通过光辐射退激的速率随核电荷数的4次方激增, 而自电离和俄歇跃迁与核电荷数的关系不大<sup>[24]</sup>. 高电荷态离子轰击金属或半导体材料的光辐射研究, 有助于深入理解离子入射表面的能量转移机理, 特别是相互作用过程中形成的高里德堡原子

\* 国家自然科学基金(批准号: 11174296)和国家重点基础研究发展973计划(批准号: 2010CB832901)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: z.yang@impcas.ac.cn

外壳层空穴引起的多电子组态间的跃迁. 目前, 高电荷态离子入射半导体材料的可见光发射实验数据相对缺乏.

基于以上考虑, 我们从实验上研究了  $\text{Kr}^{q+}$  ( $q = 15, 17$ ) 离子轰击 GaAs 单晶 (100) 面的表面形貌的变化和可见光发射.

## 2 实验装置与测量方法

实验在中国科学院近代物理研究所 320 kV 高电荷态离子综合研究平台进行.  $\text{Kr}^{q+}$  ( $q = 15, 17$ ) 离子由电子回旋共振离子源 (ECRIS) 提供, 经平台上  $90^\circ$  分析磁铁、 $90^\circ$  二极偏转磁铁、四极磁透镜组、光栏组等, 进入超高真空 ( $\sim 2 \times 10^{-8}$  mbar (1 bar =  $10^5$  Pa)) 靶室.

如图 1 所示<sup>[21,23]</sup>, 炮弹离子以  $\theta = 45^\circ$  方向入射到纯度为 99.99% 的 GaAs 单晶 (100) 面上. 样品表面积为  $20.5 \text{ mm} \times 18.5 \text{ mm}$ , 厚度为 0.5 mm. 束斑直径控制在 5 mm 内, 束流强度约为 250 nA.

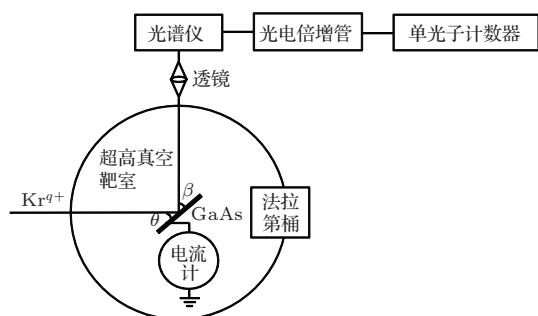


图1  $\text{Kr}^{q+}$  ( $q = 15, 17$ ) 离子入射 GaAs 单晶 (100) 面的实验示意图

$\text{Kr}^{q+}$  ( $q = 15, 17$ ) 离子与 GaAs(100) 面相互作用发出的可见光先用距其 35 mm 的透镜聚焦, 后由入射、出射狭缝均为  $500 \mu\text{m}$  的 LRS-2/3 型光谱仪收集分析, 最后被光电倍增管和单光子计数器组成的数据获取系统接收. 单色仪的光栅常数为  $1200 \text{ g/mm}$ , 闪耀波长为  $500 \text{ nm}$ , 有效扫描范围为  $200\text{--}800 \text{ nm}$ , 色散为  $2.7 \text{ nm/mm}$ . 当狭缝为  $10 \mu\text{m}$  时, 其分辨率为  $0.5 \text{ nm}$ . 光谱仪入射狭缝与出射光子束方向垂直, 与靶表面夹角为  $\beta = 45^\circ$ . 光谱仪的步进电机由一台计算机控制, 以  $0.2 \text{ nm}$  的扫描步长和  $1 \text{ s}$  的积分时间来累积光谱. 实验波长扫描范围为  $375\text{--}500 \text{ nm}$ , 每段光谱的测量时间为  $625 \text{ s}$ . 实验测量之前, 用钠灯的  $589.0 \text{ nm}$  和  $589.6 \text{ nm}$  谱线校准光谱仪, 重复测量了二十次, 谱线强度误差小于 10%.

实验中束流强度保持在约  $240\text{--}260 \text{ nA}$  之间. 为了尽量降低光谱测量时的本底, 实验在暗室中进行.

利用原子力显微镜 (AFM) 观测了  $\text{Kr}^{q+}$  ( $q = 15, 17$ ) 离子束轰击 GaAs 单晶 (100) 面后表面形貌的变化. AFM 的型号为 MFP-3D-SA, 分辨率为  $10 \text{ nm}$ , 测量样品尺寸为  $80 \mu\text{m} \times 80 \mu\text{m}$ .

## 3 实验结果与讨论

### 3.1 $\text{Kr}^{q+}$ ( $q = 15, 17$ ) 离子轰击 GaAs 单晶 (100) 面的表面形貌变化

图 2 所示为  $\text{Kr}^{q+}$  ( $q = 15, 17$ ) 离子束以  $45^\circ$  角入射 n 型 GaAs 单晶 (100) 面后的表面形貌. 由于有限的制备和清洁工艺, 未辐照 GaAs 单晶 (100) 面的均方根粗糙度 RMS<sup>[25]</sup> 约为  $0.76 \text{ nm}$ , 凹陷与凸起高度  $h$  在  $-2.92\text{--}3.24 \text{ nm}$  之间, 如图 2 (a) 所示.  $\text{Kr}^{15+}$  离子束入射 GaAs(100) 面后的表面形貌如图 2 (b) 所示, 样品表面的 RMS 增加至约  $3.80 \text{ nm}$ ,

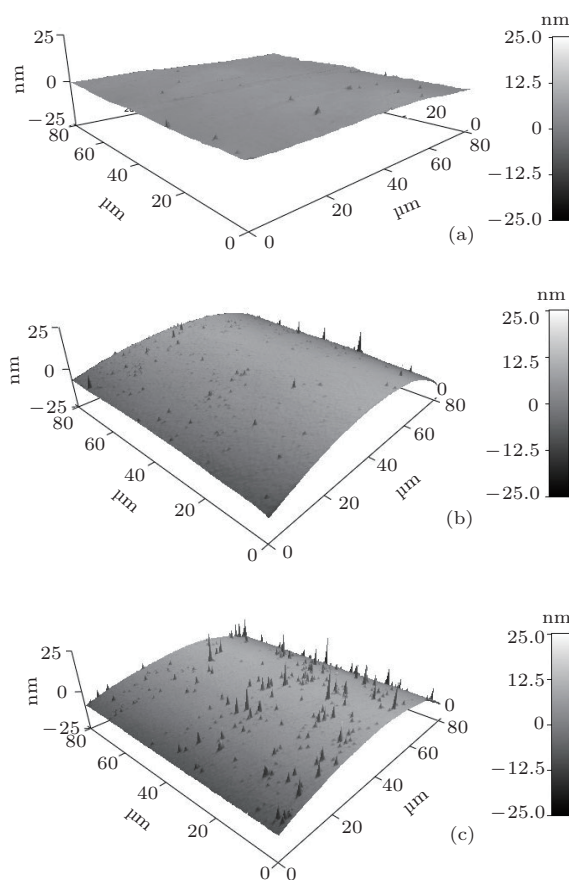


图2  $\text{Kr}^{q+}$  ( $q = 15, 17$ ) 离子轰击后的 GaAs 表面形貌 (a) 未辐照; (b) 剂量为  $8.28 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ , 能量为  $345 \text{ keV}$  的  $\text{Kr}^{15+}$  斜入射; (c) 剂量为  $7.31 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ , 能量为  $340 \text{ keV}$  的  $\text{Kr}^{17+}$  斜入射

表面纳米结构幅度增大,  $h$  的范围增大, 在  $-14.95-9.27$  nm 之间. 当  $\text{Kr}^{17+}$  辐照时, 随着电荷态的增加, 表面粗糙度 RMS 增加至约 4.87 nm, 表面凸起密度及高度均明显增加,  $h$  约在  $-14.97-25.64$  nm 之间, 凸起的最大横向宽度约为 3000 nm, 如图 2 (c) 所示.

载能  $\text{Kr}^{15+}$  离子束接近 GaAs 单晶 (100) 面时, 其强库仑场作用使其俘获负电荷, GaAs 晶格结构因而发生变化, 样品表面 Ga-As 化学键断裂、As 被析出, 在样品表面形成 Ga 的填隙和 As 的空位 [2,25-28].  $\text{Kr}^{17+}$  入射时, 随着入射离子束势能的增加 ( $\text{Kr}^{15+}$  和  $\text{Kr}^{17+}$  离子的势能分别为 2974 eV 和 4105 eV), 离子在逼近 GaAs 表面时, 在极短时间 (fs 量级) 内受瞬时强库仑场作用会俘获更多电子而中性化, 使晶体表面很小体积内正电荷积累并相互排斥, 引起粒子大量溅射 [25,27,28]. 由于级联碰撞与点缺陷的运动 [2], 晶体表面可能出现更多 Ga 和 As 的集团. 因此样品表面的凸起高度无规则, 凸起密度增加. 通过程序 TRIM 的计算, 离子动能在 340 keV 时, 总能损约为 1.988 keV/nm. 由于两种炮弹离子的入射角相同、入射动能相差很小、入射剂量的数量级相同, 所以表面形貌的变化主要来自于电荷态的差异.

### 3.2 $\text{Kr}^{q+}$ ( $q = 15, 17$ ) 离子轰击 GaAs 单晶 (100) 面的可见光光谱

图 3 (a) 和 (b) 所示为  $\text{Kr}^{15+}$  和  $\text{Kr}^{17+}$  离子斜入射 GaAs 单晶 (100) 面发射的可见光光谱. 跃迁谱线有两种, 分别为 Ga 原子和  $\text{Kr}^{q+}$  离子的跃迁光谱. 本底主要是光电倍增管的暗计数. 波长与跃迁

类型的标定均参照美国国家标准局数据库 (NIST database) [29], 波长偏差在 0.1—0.4 nm 之间. 靶原子 Ga 的受激辐射跃迁如图 4 所示, 入射离子中性化的光辐射跃迁如图 5 所示.

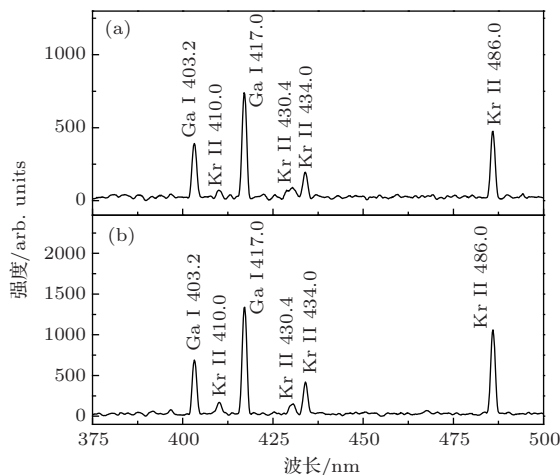


图 3  $\text{Kr}^{q+}$  ( $q = 15, 17$ ) 离子轰击 GaAs 单晶 (100) 面的可见光光谱 (实验观测的波长范围为 375—500 nm, 两条 Ga 原子激发跃迁谱线为 Ga I 403.2 nm 和 Ga I 417.0 nm, 四条  $\text{Kr}^{q+}$  离子的光辐射谱线分别为 Kr II 410.0 nm, Kr II 430.4 nm, Kr II 434.0 nm 和 Kr II 486.0 nm, Ga I 417.0 nm 和 Kr II 486.0 nm 谱线较强, 谱线的半高全宽  $\Delta\lambda_{\text{FWHM}} \sim 2.0$  nm) (a) 345 keV 的  $\text{Kr}^{15+}$  入射; (b) 340 keV 的  $\text{Kr}^{17+}$  入射

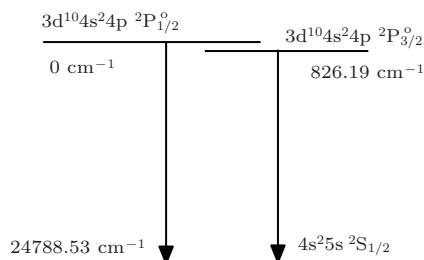


图 4  $\text{Kr}^{q+}$  ( $q = 15, 17$ ) 离子轰击 GaAs 单晶 (100) 面, Ga 原子受激辐射跃迁示意图

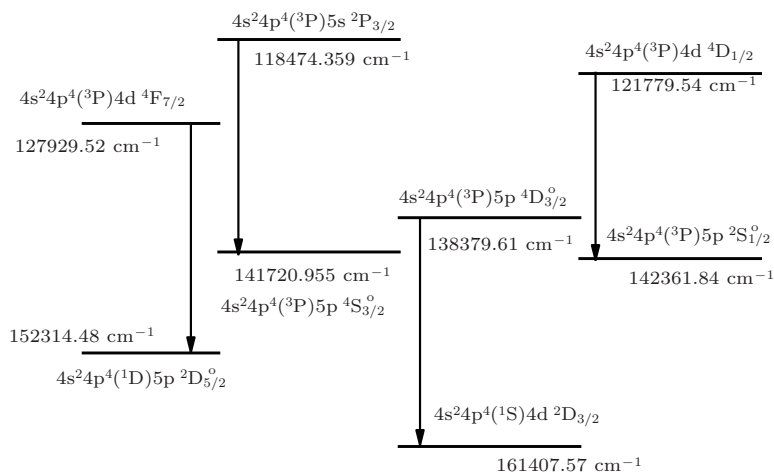


图 5  $\text{Kr}^{q+}$  ( $q = 15, 17$ ) 离子轰击 GaAs 单晶 (100) 面,  $\text{Kr}^{q+}$  离子的辐射跃迁示意图

340 keV 的  $\text{Kr}^{15+}$  离子入射 GaAs 单晶 (100) 面过程中, 离子与表面的距离达到临界距离<sup>[10,12]</sup>  $R_c \approx 31.9$  a.u. 时开始俘获导带电子, 然后逐次俘获 GaAs 导带多个电子, 并释放其所携带的大部分 ( $\sim 90\%$ ) 势能到靶表面<sup>[30]</sup>, 使表面 Ga 原子处于激发态, 退激辐射 Ga I 403.2 nm 和 Ga I 417.0 nm 两条跃迁谱线, 光强比  $I(403.2 \text{ nm})/I(417.0 \text{ nm})$  约为 1 : 1.88, 如图 3(a) 所示. 从对应跃迁的电子组态和谱项(图 4) 可以看出, Ga I 原子的两条谱线的上能级是同一组态  $4s^25s$ , 下能级是同一组态  $3d^{10}4s^24p$  的不同谱项. 当  $\text{Kr}^{17+}$  离子入射时, 随着炮弹离子电荷态的升高, 沉积到表面原子的能量增加, 而激发靶原子电子的能态相同, 光辐射产额增加至  $\text{Kr}^{15+}$  入射时光产额的 1.8 倍, 如图 3(b) 所示. 由于实验测量范围的限制, 没有观测到 As 原子的跃迁光谱线 As I 506.898 nm. 实验为低能入射, 且实验中溅射离子的产额远远低于溅射原子的产额<sup>[2,31]</sup>, 未观测到任何电离靶原子 Ga II 和 Ga III 的退激谱线.

根据经典过垒模型 (COBM)<sup>[9-14]</sup>, 在相互作用过程中,  $\text{Kr}^{15+}$  离子第一次俘获电子的临界距离<sup>[10,12]</sup>  $R_c \approx 31.9$  a.u., 俘获的电子进入离子与导带匹配的能级<sup>[10,12]</sup>  $n_c \approx 17$ , 镜像电荷的动能增益<sup>[8,10,12]</sup> 为  $\Delta E_{\text{im}} \approx 64.50$  eV, 离子的速度  $v \approx 0.40$  a.u., 离子在上表面经历的时间约为  $19.29 \times 10^{-16}$  s, 离子俘获靶表面导带电子形成多激发态的高里德堡原子, 通过级联退激辐射光子<sup>[32]</sup>, 电子填充外壳层空穴辐射可见光. 可见光的发射与类氢类氦离子与固体相互作用过程中形成的空心原子中电子填充内壳层空穴退激辐射 X 射线不同<sup>[11,23]</sup>.  $\text{Kr}^{15+}$  离子基态电子组态为  $1s^22s^22p^63s^23p^63d^3$ , 3d, 4p 壳层有空穴. 相互作用过程中形成的高激发态原子级联退激使 P 壳层中电子跃迁, 发射可见光. 实验观测到入射离子中性化过程中的四条跃迁谱线, 分别属于 Kr II 410.0 nm ( $4d^4F_{7/2}-5p^2D_{5/2}^o$ ), Kr II 430.4 nm ( $5s^2P_{3/2}-5p^4S_{3/2}^o$ ), Kr II 434.0 nm ( $5p^4D_{3/2}^o-4d^2D_{3/2}$ ) 和 Kr II 486.0 nm ( $4d^4D_{1/2}-5p^2S_{1/2}^o$ ), 它们的强度比  $I(410.0 \text{ nm}) : I(430.4 \text{ nm}) : I(434.0 \text{ nm}) : I(486.0 \text{ nm})$  约为 1 : 1.35 : 2.86 : 7.15. 当  $\text{Kr}^{17+}$  离子入射时, 开始俘获电子进入的能级约为 19, 经级联退激发射光谱的能量位置没有改变; 与较低电荷态  $\text{Kr}^{15+}$  入射时的光强度相比, 谱线 Kr II 430.4 nm 的强度增至约 1.6 倍, Kr

II 410.0 nm, Kr II 434.0 nm 和 Kr II 486.0 nm 的强度增加至 2 倍多. 实验测量的光谱线的半高全宽  $\Delta l_{\text{FWHM}} \sim 2.0$  nm. 由于有限的光谱分辨率, 很难区分重叠的光谱线.  $\text{Kr}^{q+}$  离子完全中性化产生的 Kr 原子的跃迁谱线在 Kr I 427.397 nm 和 Kr I 431.958 nm 处较强. 所以图 3 中谱线 Kr II 430.4 nm 和 Kr II 486.0 nm 可能包含谱线 Kr I 427.397 nm 和 Kr I 431.958 nm. 为了鉴别这些跃迁谱线, 光谱仪的分辨率需要在 0.5 nm 内. 高电荷态离子与固体表面相互作用的可见光发射的详细机理有待进一步深入研究.

## 4 结 论

室温下, 实验测量了  $\text{Kr}^{15+,17+}$  离子轰击半导体材料 GaAs 单晶 (100) 面的表面形貌变化和可见光光谱.  $\text{Kr}^{q+}$  ( $q = 15, 17$ ) 离子辐射 GaAs 单晶表面后, 表面膨胀凸起, 凸起峰结构宽度、高度不规则, 表面形貌的变化主要由电荷态  $q$  决定. 入射离子  $\text{Kr}^{15+}$  沉积到靶表面的能量激发 Ga 原子, 退激发射光谱为 Ga I 403.2 nm 和 Ga I 417.0 nm. 入射离子中性化过程中形成的高激发态原子级联退激填充 3p, 4d 等空穴, P 壳层电子跃迁退激辐射四条  $\text{Kr}^{q+}$  离子跃迁谱线. 当较高电荷态  $\text{Kr}^{17+}$  离子入射时, 激发 Ga 原子电子跃迁的能级相同, 入射离子中性化过程中形成的高激发态原子级联退激辐射光子的能量位置未改变, 光辐射产额大大增加. 入射离子与 GaAs 晶体相互作用发射的可见光强度与入射离子的电荷态密切相关. 本工作有助于理解高电荷态离子与固体表面相互作用过程中外壳层空穴退激和能量转移过程.

感谢中国科学院近代物理研究所 320 kV 高电荷态离子综合研究平台工作人员提供实验束流. 感谢于得洋博士、张红强博士、张丽卿的有益讨论.

## 参考文献

- [1] Memon A, Fakhro S Q 1987 *Int. J. IR Millim Waves* **8** 1391
- [2] Wang G H 1988 *Physics of particle interaction with solids* (Beijing: Scientific Press) (in Chinese) [王广厚 1988 粒子同固体相互作用物理学 (北京: 科学出版社)]
- [3] Look D C 1987 *J. Electrochem Soc.* **134** 2527
- [4] Williams J S 1998 *Mater. Sci. Eng.* **253** 8



- [5] Pearton S J, Poate J M, Sette F, Gibson J M, Jacobson D C, Williams J S 1987 *Nucl. Instrum. Meth. B* **19** 369
- [6] Pearton S J 1991 *Solid State Phenomena* **1-2** 247
- [7] Sharma B L 1989 *Def. Sci. J.* **39** 353
- [8] Winter H, Auth C, Schuch R, Beebe E 1993 *Phys. Rev. Lett.* **71** 1939
- [9] Burgdorfer J, Morgenstern R, Niehaus A 1986 *J. Phys. B: At. Mol. Phys.* **19** L507
- [10] Burgdorfer J, Lerner P, Meyer F W 1991 *Phys. Rev. A* **44** 5674
- [11] Schenkel T, Hamza A V, Barnes A V, Schneider D H 1999 *Progress in Surface Science* **61** 23
- [12] Burgdorfer J, Reinhold C, Hagg L, Meyer F 1996 *Aust. J. Phys.* **49** 527
- [13] Briand J P, Giardino G, Borsoni G, Le Roux V, Bechu N, Dreuil S, Tuske O, Machicoane G 2000 *Review of Scientific Instruments* **71** 627
- [14] Grether M, Niemann D, Spieler A, Stolterfoht N 1997 *Phys. Rev. A* **56** 3794
- [15] Thomaschewski J, Bleck-Neuhaus J, Grether M, Spieler A, Stolterfoht N 1998 *Phys. Rev. A* **57** 3665
- [16] Zhang X A, Xiao G Q, Wang W S, Mao R S 2002 *Nucl. Phys. Rev.* **19** 342 (in Chinese) [张小安, 肖国青, 王武生, 毛瑞士 2002 原子核物理评论 **19** 342]
- [17] Lee C S, Chang Y C, Ji T Y 1997 *Nucl. Instrum. Meth. B* **132** 391
- [18] Qayyum A, Akhtar M N, Riffat T 2005 *Radiat Phys. Chem.* **72** 663
- [19] Rajasekar P, Scott D, Materer N F 2006 *Nucl. Instrum. Meth. B* **245** 411
- [20] Cazalilla M A, Lorente N, Diez Muino R, Gauyacq J P, Teillet-Billy D, Echenique P M 1998 *Phys. Rev. B* **58** 13991
- [21] Yang Z H, Xu Q M, Guo Y P, Wu Y H, Song Z Y 2013 *Chin. Phys. Lett.* **30** 013201
- [22] Yang Z R, Zhang X A, Xu Q M, Yang Z H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 043401 (in Chinese)[杨兆锐, 张小安, 徐秋梅, 杨治虎 2013 物理学报 **62** 043401]
- [23] Yang Z H, Song Z Y, Cui Y, Zhang H Q, Ruan F F, Shao J X, Du J, Liu Y W, Zhou K X, Zhang X A, Shao C J, Lu R C, Yu D Y, Chen X M, Cai X H 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 803 (in Chinese)[杨治虎, 宋张勇, 崔莹, 张红强, 阮芳芳, 邵健雄, 杜鹃, 刘玉文, 朱可欣, 张小安, 邵曹杰, 卢荣春, 于得洋, 陈熙萌, 蔡晓红 2008 物理学报 **57** 803]
- [24] Bethe H A, Salpeter E E 1977 *Quantum Mechanics of One- and Two-electron Atoms* (New York Plenum Publishing Corporation)
- [25] Zhang L Q, Zhang C H, Yang Y T, Yao C F, Sun Y M, Li B S, Zhao Z M, Song S J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5578 (in Chinese)[张丽卿, 张崇宏, 杨义涛, 姚存峰, 孙友梅, 李炳生, 赵志明, 宋书建 2009 物理学报 **58** 5578]
- [26] Kucheyev S O, Williams J S, Jagadish C, Li G, Pearton S J 2000 *Appl. Phys. Lett.* **76** 3899
- [27] Yang Y T, Zhang C H, Sun Y M, Yao C F, Zhao Z M 2007 *Nucl. Technol.* **30** 318 (in Chinese) [杨义涛, 张崇宏, 孙友梅, 姚存峰, 赵志明 2007 核技术 **30** 318]
- [28] Zhang L Q, Zhang C H, Yang Y T, Yao C F, Li B S, Sun Y M, Song S J 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 036101
- [29] Kramida A, Ralchenko Y, Reader J, NIST ASD Team 2012 *NIST Atomic Spectra Database* (ver. 5.0) [Online] (Available: <http://physics.nist.gov/asd>; Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology)
- [30] Machicoane G A, Schenkel T, Niedermayr T R, Newmann M W, Hamza A V, Barnes A V, McDonald J M, Tanis J A, Schneider D H 2002 *Phys. Rev. A* **65** 042903
- [31] Sigmund P 1969 *Phys. Rev.* **184** 383
- [32] Lee C S, Chang Y C, Chang Y H 1999 *Nucl. Instrum. Meth. B* **149** 294

# Slow ions $^{84}\text{Kr}^{15+,17+}$ bombardment on GaAs\*

Yang Bian<sup>1)2)</sup> Yang Zhi-Hu<sup>1)†</sup> Xu Qiu-Mei<sup>1)</sup> Guo Yi-Pan<sup>1)2)</sup> Wu Ye-Hong<sup>1)2)</sup>  
Song Zhang-Yong<sup>1)</sup> Cai Xiao-Hong<sup>1)</sup>

1) (Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

2) (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

( Received 18 September 2013; revised manuscript received 20 November 2013 )

## Abstract

We have investigated surface morphology and visible light emission from slow ions  $\text{Kr}^{15+,17+}$  colliding with GaAs (100). The surface disorder of GaAs films mainly depends on the charge state of incident ions. The two spectral lines of target atom Ga belong to transitions of Ga I  $4p^2P_{1/2}^o-5s^2S_{1/2}$  at 403.2 nm and  $4p^2P_{3/2}^o-5s^2S_{1/2}$  at 417.0 nm. Light emissions of target species depend on the energy of the incident ions deposited on the target surface atoms. During the neutralization process, the four spectral lines of  $\text{Kr}^+$  respectively can be attributed to the transitions of Kr II  $4d^4F_{7/2}-5p^2D_{5/2}^o$  at 410.0 nm,  $5s^2P_{3/2}-5p^4S_{3/2}^o$  at 430.4 nm,  $5p^4D_{3/2}-4d^2D_{3/2}$  at 434.0 nm and Kr II  $4d^4D_{1/2}-5p^2S_{1/2}^o$  at 486.0 nm. They are induced by cascade de-excitation after many electrons of the conduction band of the solid surface captured in highly excited states of the incident ion. Intensities of these six spectral lines from incident ions  $\text{Kr}^{17+}$  are obviously larger than  $\text{Kr}^{15+}$ 's.

**Keywords:** surface morphology, spectrum, highly excited states

**PACS:** 32.30.Jc, 34.80.Dp, 61.80.Jh

**DOI:** 10.7498/aps.63.053201

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11174296), and the National Basic Research Program of China (Grant No. 2010CB832901).

† Corresponding author. E-mail: [z.yang@impcas.ac.cn](mailto:z.yang@impcas.ac.cn)