

红外探测器微结构的 HREM 观察

刘 峥 邵贝铃 刘安生 王 敬

(北京有色金属研究总院 分析测试技术研究所 北京 100088)

王瑞忠 钱佩信

(清华大学 微电子学研究所 北京 100084)

摘要 采用定位横断面制样的高分辨电子显微技术(HREM)观察了 $P^+-Si_{10.65}Ge_{0.35}/P-Si$ 异质结内光发射红外探测器的微结构。该器件光敏区是由 3 层 $P^+-Si_{10.65}Ge_{0.35}$ 和 2 层 UD-Si(未掺杂硅)组成, $Si_{10.65}Ge_{0.35}/UD-Si$ 层间界面不明锐, 有一个由于 Ge 原子不均匀扩散造成的过渡带。这个过渡带缓和了界面的失配应力, 因而未观察到界面晶体缺陷和严重的晶格畸变。在光敏区边缘有呈倒三角形的缺陷区, 缺陷的主要类型为层错和微孪晶。层错在 $(\bar{1}\bar{1}1)$ 面上, 而微孪晶的厚度约为 2~4 晶面间距, 其孪晶面为 $(\bar{1}\bar{1}1)$ 。非晶 SiO_2 台阶上的 $Si_{10.65}Ge_{0.35}$ 和 UD-Si 层由随机形核生长的多晶组成, 层面呈波浪状。

EEACC: 7230C; PACC: 6865, 611D

1 引言

红外探测器及红外焦平面阵列在制导、夜视、遥感、遥测、预警、深空监视、以及医学诊断等领域具有广泛和重要的应用价值。目前, 已实用化的红外探测器主要有: 工作于 $3\sim 5\mu m$ 大气窗的 InSb 和 PtSi 探测器, 以及工作于 $8\sim 14\mu m$ 大气窗的 HgCdTe 探测器。它们虽然都可在 77K 液氮温度下工作, 但它们各有优缺点。InSb 和 HgCdTe 探测器的量子效率较高, 但只能与 Si 读出电路混合集成; 而 PtSi 探测器虽然可与 Si 读出电路单片集成, 但它的量子效率较低。 $P^+-Si_{1-x}Ge_x/P-Si$ 异质结内光发射红外探测器可以具有以上两类探测器的优点, 可同时工作于 $3\sim 5\mu m$ 和 $8\sim 14\mu m$ 两个大气窗, 量子效率高于硅化物肖特基势垒探测器, 响应波长可调, 同时, 容易与 CMOS 或 CCD 读出电路实现单片集成, 工艺简单, 成本较低, 近年来已引起人们极大的兴趣。1990 年, 美国加州理工学院喷气推进实验室 T. L. Lin 等人用分子束外延(MBE)方法首先制成 $P^+-Si_{1-x}Ge_x/P-Si$ HIP 红外探测器^[1], 响应范围 $2\sim 10\mu m$, 量子效率可达 1%。1991 年, 麻省理工学院林肯实验室 B. Y. Tsaur 等人成功地研制出 400×400 象元的 $P^+-Si_{1-x}Ge_x/P-Si$ HIP(异质结构内光发射)红外焦平面阵列^[2], 并同

* 国家自然科学基金资助项目, 批准号为 69576002

刘 峥 女, 1967 年出生, 现在日本东北大学金属材料研究所攻读博士学位, 从事材料的微结构研究
1998-05-20 收到, 1998-11-20 定稿

CCD 读出电路实现单片集成, 截止波长 $9.3\mu\text{m}$, 响应不均匀性低于 1% , 最小可分辨温度小于 0.2K . 1993 年, 复旦大学应用表面物理国家重点实验室也成功地研制出 $\text{P}^+ - \text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x / \text{P-Si H IP}$ 红外探测器, 截止波长达 $9\mu\text{m}$, 52K 下, 对 500K 黑体的探测度 $D_{500\text{K}}^*$ 为 $2.0 \times 10^8 \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ ^[3,4]. 但是, 它们对器件的微结构都没有进行直接观察和研究

1997 年, 王瑞忠等人^[5,6]制备出具有较高量子效率的 $\text{P}^+ - \text{Si}_{0.65}\text{Ge}_{0.35} / \text{P-Si}$ 异质结内光发射红外探测器, 在 77K 下的性能提高到在不加偏置电压的条件下 $D^*(5.5, 1000, 1) = 1.1 \times 10^{10} \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$, 峰值量子效率可达 4% , 响应范围 $2 \sim 8\mu\text{m}$. 它在 77K 下表现出理想的二极管特性, 反向漏电流密度仅为 $10^{-4} \text{A} / \text{cm}^2$. 结合器件研制, 我们采用了几种电子显微方法对其微结构进行了研究. 本文将介绍采用高分辨电子显微技术对其界面和缺陷观察的结果

2 实验

J. S. Park 等人^[7]和王瑞忠等人^[5]的研究工作都表明, 可以采用层叠结构的发射极, 将每一个单层 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 的厚度变薄, 使之具有较高的内量子效率, 从而提高了探测器的量子效率. 为此, 实验试样是在 P-Si 衬底上用 MBE 方法选区生长 3 层 $\text{P}^+ - \text{Si}_{0.65}\text{Ge}_{0.35}$, 它们之间用未掺杂的 $\text{Si}(\text{UD-Si})$ 隔开, 如图 1 所示(见图版 I). $\text{Si}_{0.65}\text{Ge}_{0.35}$ 和 UD-Si 层的设计厚度分别为 5nm 和 30nm . 为了有效地抑制 B 的外扩散, 减小器件的漏电流, 对这 3 层 $\text{Si}_{0.65}\text{Ge}_{0.35}$ 进行 δ 掺杂, 即在与硅相邻的 1nm 厚的 $\text{Si}_{0.65}\text{Ge}_{0.35}$ 层内不进行掺杂, 其他部分的 B 掺杂浓度为 $1 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$. 该器件的关键工艺是用 MBE 法选区生长 $\text{Si}_{0.65}\text{Ge}_{0.35}$ 层, 所用设备为英国 VG Sem icon V 80S. 生长前先用传统清洗方法清洗 P-Si 衬底的表面. 然后, 将衬底送入预处理室, 在 450°C 下除气 0.5h , 再送入生长室内, 先在 950°C 下使 P-Si 衬底表面脱膜 15min , 将清洗时形成的防止 C, O 沾污的 SiO_2 膜去掉, 使之露出清洁的硅表面. 这样, 就可以生长 $\text{Si}_{0.65}\text{Ge}_{0.35}$ 层了. 生长前生长室的真空度为 $1.3 \times 10^{-8} \text{Pa}$, 生长时真空度为 $1.3 \times 10^{-6} \text{Pa}$. 生长时衬底温度为 650°C . 采用热硼源进行 P^+ 掺杂, 硼源温度为 1700°C . 生长速率控制在每秒钟 $0.1 \sim 0.2\text{nm}$. 图 1 中左侧的 P^+ 区的作用是使铝电极与硅衬底形成良好的欧姆接触. 考虑到光敏区边缘的 $\text{Si}_{0.65}\text{Ge}_{0.35}$ 和 UD-Si 层中可能存在缺陷, 引起漏电, 制作了一个 N^+ 区作为保护环, 减小器件在边界处的漏电.

为了研究这种红外探测器的微结构, 衍射衬度像和高分辨电子显微像观察使用的样品采用定点横断面制备方法. 将带有器件的硅片按预先制作的标记面对面地用环氧树脂对粘, 用慢速金刚砂轮锯从指定位置切成薄片, 使薄片试样中含有器件, 再用金刚石研磨膏研磨至 $20\mu\text{m}$ 左右, 然后, 用离子减薄仪减薄至刚好穿孔. 所用离子减薄仪的型号为 Gatan 600, 离子束流为 0.5mA / 单枪, 加速电压为 5kV , 入射角为 $15 \sim 12^\circ$. 为研究器件的微结构对性能的影响, 我们将重点观察图 1 中有代表性的 A、B 和 C 三个区域的微结构. 实验中分别采用 JEM -2000FX 型和 JEM -2010 型透射电子显微镜进行衍衬像和高分辨电子显微像观察, 运转电压为 200kV .

3 实验结果和讨论

图 2(见图版 I) 是 $\text{P}^+ - \text{Si}_{0.65}\text{Ge}_{0.35} / \text{P-Si}$ 异质结内光发射红外探测器横断面的微结构像

器件的光敏区较大,为 $100\mu\text{m}$,由于版面的限制,只能给出该器件一端的横断面像。可以看出, P-Si 衬底的表面平整。图 2 中右上角的电子衍射花样是 A 区 $\text{Si}_{0.65}\text{Ge}_{0.35}$ /P-Si 上拍摄的花样。电子衍射花样表明,图面的法线方向为 $[011]$, P-Si 衬底表面的取向为 $[100]$ 。衬底中未见晶体缺陷。但在试样倾转时,可以看到制备透射电镜的薄膜样品时,膜面局部弯曲引起的消光条纹。在光敏区(A 区)中, $\text{Si}_{0.65}\text{Ge}_{0.35}$ 层呈现黑色细线状,而 UD-Si 层在此成像条件下与衬底 P-Si 一样,呈浅灰色。

图 3(见图版 I)是 A 区中一小段 $\text{P}^+ - \text{Si}_{0.65}\text{Ge}_{0.35}$ /UD-Si 层与 P-Si 衬底的高分辨电子显微像。由于版面的限制,不可能在 200 万倍下将整个层叠结构的高分辨像完整地给出。我们只能切去一部分 UD-Si 层的像,将三个 $\text{Si}_{0.65}\text{Ge}_{0.35}$ 层及其界面附近区域的高分辨像示出,如图 3(a)、(b)、(c)所示。Ge 原子比 Si 原子重,在高分辨像中,深灰色的横向条带为 $\text{Si}_{0.65}\text{Ge}_{0.35}$ 层,而浅灰色的区域为 UD-Si,像的最下面为 P-Si 衬底。可以看到,从微观尺度看 $\text{P}^+ - \text{Si}_{0.65}\text{Ge}_{0.35}$ /UD-Si 界面和 $\text{P}^+ - \text{Si}_{0.65}\text{Ge}_{0.35}$ /P-Si 界面不太平直,稍有起伏,而且界面不明锐,有一个衬度不均匀的过渡带。如果按过渡带的中线划分层, $\text{Si}_{0.65}\text{Ge}_{0.35}$ 层的厚度大约为 6nm,而 UD-Si 层的厚度大约为 32nm。本实验样品在 $\text{Si}_{0.65}\text{Ge}_{0.35}$ 和 UD-Si 层生长以后,后处理的温度都没有超过生长时基体的温度,外延生长的温度也只有 650,但是, $\text{Si}_{0.65}\text{Ge}_{0.35}$ 层中的 Ge 原子仍然向 UD-Si 层和 P-Si 衬底中扩散。在 $\text{Si}_{0.65}\text{Ge}_{0.35}$ 层与 Si 层间失配引起的应力场作用下,Ge 原子的扩散是不均匀的。这种 Ge 原子的外扩散,将使红外探测器漏电增加,同时,影响其光学特性,如量子效率和探测率等。实验表明^[8],如果外延生长后,将它在 1000 退火 10s 后,Ge 原子剧烈向外扩散,使 $\text{Si}_{0.65}\text{Ge}_{0.35}$ 层发生蜕化,器件性能变坏甚至失效。对于 $\text{Si}_{0.65}\text{Ge}_{0.35}$ /Si 界面来说,其失配度达 2.1%。但是,我们检查了光敏区 $\text{Si}_{0.65}\text{Ge}_{0.35}$ /Si 异质结界面的大量高分辨像,均未找到晶格缺陷和明显的晶格畸变。这可能是由于 Ge 原子扩散形成一个过渡带使它们之间的应力在界面的垂直方向上有一个梯度分布,从而缓和了晶格缺陷的发生。以上观察表明,通过改进生长设备和工艺,进一步提高界面平整度,减小扩散引起的过渡层,器件性能还可以进一步提高。

在光敏区的边缘,从衍衬像上可以看到 $\text{Si}_{0.65}\text{Ge}_{0.35}$ 层的像的条纹变弯,如图 4(a)(见图版 I)所示。从图 4(b)(见图版 I)所示的高分辨像中可以看出,作为绝缘层的非晶 SiO_2 层边缘的斜面上的 $\text{Si}_{0.65}\text{Ge}_{0.35}$ /UD-Si 层是多晶层。尽管光敏区边缘处的 $\text{Si}_{0.65}\text{Ge}_{0.35}$ /UD-Si 层是在单晶的 P-Si 衬底上生长起来的,但它仍然要受到侧面同时生长的多晶层的作用,而在光敏区一侧产生缺陷。在外延生长的初期,这些缺陷的区域比较小,随着外延生长,缺陷区域愈长愈大,形成一个倒三角形状。在最后的外延层中,缺陷区域宽达 42nm,而光敏区的宽度为 $100\mu\text{m}$ 。电子束的入射方向为 $[011]$ 。从分析可知,该处的缺陷主要是层错和微孪晶。层错在 $(\bar{1}\bar{1}1)$ 面上。孪晶面也为 $(\bar{1}\bar{1}1)$ 面。绝大多数微孪晶的厚度仅为 2~4 晶面间距。可见,光敏区边界并不是理想的完整晶体结构。在工艺上要防止单晶区和多晶区界面处生长时不产生缺陷是很困难的,只能使缺陷区域尽可能小。这些缺陷的存在可能导致漏电。为了减少漏电,在光敏区边界的 P-Si 一侧制作了 N^+ 区作为保护环,如图 1 中所示。由于我们观察到的缺陷区域还不到 $0.05\mu\text{m}$,因此,保护环还可以做得更窄一些。虽然 N^+ 区的掺杂使该区散射因子不同于 P-Si 衬底的其他区域,但它对入射电子束的散射的影响还是相当小,以致于我们观察不到它们。

在光敏区的边缘是作为绝缘层的非晶 SiO_2 层,其层厚为 410nm。在与光敏区交界处为

约 58 的斜面 该非晶 SiO_2 层是用热氧化方法制备的 非晶 SiO_2 层与 P-Si 衬底的界面光滑平直, 如图 5 所示 非晶 SiO_2 /P-Si 界面在 $[100]$ 方向的起伏不超过 3 个晶面间距 比较图 3 和图 5, 可以看出, 它的平直度优于光敏区表面的平直度

图 6 为绝缘非晶 SiO_2 层上 $\text{Si}_{10.65}\text{Ge}_{0.35}$ /UD-Si 层叠(C 区)的高分辨像 由于版面的限制, 我们只能给出三个 $\text{Si}_{10.65}$

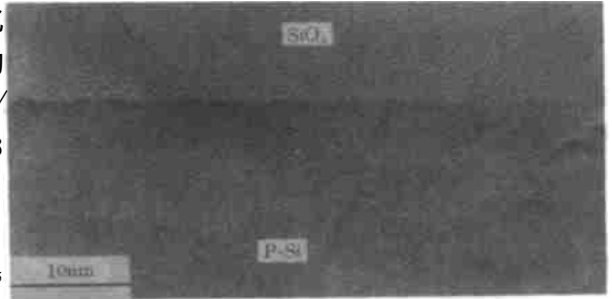


图 5 非晶 SiO_2 /P-Si 界面的高分辨电子显微像

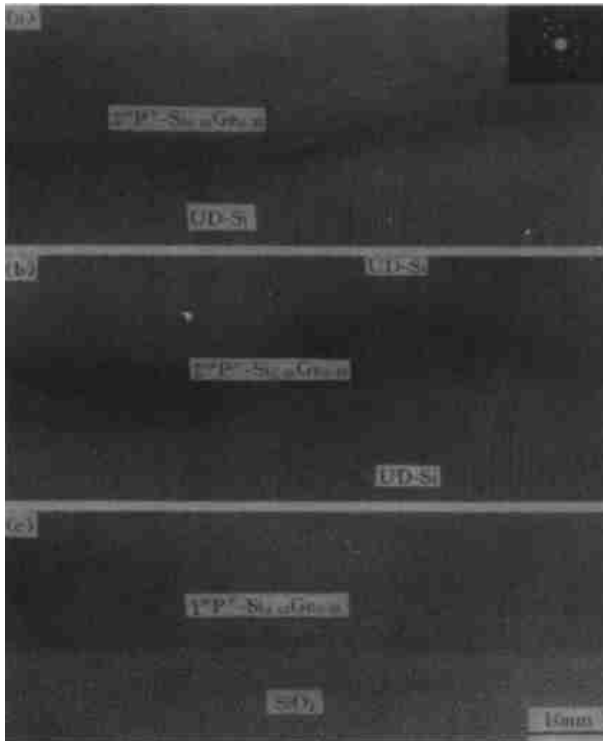


图 6 非晶 SiO_2 台阶上多层 $\text{Si}_{10.65}\text{Ge}_{0.35}$ /UD-Si 结构的高分辨电子显微像

$\text{Ge}_{0.35}$ 层及其界面附近区域的高分辨像, 如图中的 (a)、(b)、(c) 所示 可以看出, 非晶 SiO_2 层表面是平整的, 而 $\text{Si}_{10.65}\text{Ge}_{0.35}$ /UD-Si 层都是由多晶组成的 这是因为第一层 $\text{Si}_{10.65}\text{Ge}_{0.35}$ 是在非晶 SiO_2 层上生长的, 生长的初期 $\text{Si}_{10.65}\text{Ge}_{0.35}$ 在 SiO_2 表面上随机成核 从照片上可以看出, 这些晶核间的距离约 5~12nm. 然后, 以这些晶核为中心外延生长, 由于晶核之间距离近, 生长过程中相互作用, 长到一定程度, 晶粒生长方向发生变化, 而没有长成贯通的柱状晶 一般来说, 晶粒越大, 晶粒在生长方向越长 继后的 UD-Si 层和 $\text{Si}_{10.65}\text{Ge}_{0.35}$ 层就是按这样的方式生长的 由于在不同的晶向, 生长速度不同, 因此, 它们生长成波浪形状的 $\text{Si}_{10.65}\text{Ge}_{0.35}$ /UD-Si 多晶层 同时, 可以看出非晶 SiO_2 上的第一个 $\text{Si}_{10.65}\text{Ge}_{0.35}$ 层的厚度比较大, 而且颜色也比较淡 这表明该层 Ge 原子扩散比以后的第二、第三个 $\text{Si}_{10.65}\text{Ge}_{0.35}$ 层的要厉害 这与 SiO_2 热导率差,

生长过程中 SiO_2 表面温度可能高于 P-Si 表面温度有关

4 结论

(1) 该器件的光敏区是由 3 层 $\text{P}^+ - \text{Si}_{10.65}\text{Ge}_{0.35}$ 和 2 层 UD-Si 组成 从高分辨像看, $\text{P}^+ - \text{Si}_{10.65}\text{Ge}_{0.35}$ 和 UD-Si 层不太平直, 稍有起伏 $\text{P}^+ - \text{Si}_{10.65}\text{Ge}_{0.35}$ /UD-Si 界面不明锐, 有一个由于 Ge 原子不均匀扩散造成的过渡带 这个过渡带使层间失配应力在界面的垂直方向形成一个梯度分布 因而, 未观察到界面晶格缺陷和严重的晶格畸变 观察结果表明, 通过改进生长设备和工艺, 提高平整度, 减小 Ge 扩散的过渡层, 器件的性能还可能进一步提高

(2) 在光敏区边缘的单晶层与非晶 SiO_2 台阶斜面处的多晶层交接处的光敏区一侧存在缺陷区, 该区域呈倒三角形, 缺陷区宽度小于 $0.05\mu\text{m}$. 缺陷的类型主要是层错和微孪晶, 层错在 $(1\ 11)$ 面上, 而微孪晶的厚度约 $2\sim 4$ 晶面间距, 其孪晶面为 $(\bar{1}\ \bar{1}1)$. 说明引入 N^+ 区保护环是必要的, 但可以做得更窄一些

(3) SiO_2 台阶上的 $\text{Si}_{0.65}\text{Ge}_{0.35}/\text{UD-Si}$ 层是由非晶 SiO_2 表面上随机形核生成的晶粒组成的, 在生长方向上没有形成柱状晶, 不同的晶向生长速度不同, 多晶 $\text{Si}_{0.65}\text{Ge}_{0.35}/\text{UD-Si}$ 层呈波浪形状

参 考 文 献

- [1] T. L. Lin and J. Maserjian, Appl Phys Lett, 1990, 57(14): 1422
- [2] B. Y. Tsaur *et al*, IEEE Electron Device Lett, 1991, 12(6): 293
- [3] 龚大为, 杨小平, 卫星, 等, 半导体学报, 1993, 14(4): 260~ 263
- [4] 龚大为, 卢学坤, 卫星, 等, 红外与毫米波学报, 1994, 13(2): 149~ 152
- [5] 王瑞忠, 等, 激光与红外, 1997, 27(6): 362
- [6] 王瑞忠, 等, 半导体学报, 1997, 18(6): 436~ 440
- [7] J. Park, T. L. Lin, E. Jones *et al*, SPIE, 1993, 2020: 12~ 21
- [8] 陈培毅, 王瑞忠, 钱佩信, 第五届全国固体薄膜学术会议论文集, 中国奉化, 1996, p. 112~ 114

HREM Observation of Microstructure of Infrared Detector

Liu Zheng, Shao Beiling, Liu Ansheng, Wang Jing

(General Research Institute for Nonferrous Metals, Beijing 100088)

Wang Ruizhong, Tsien Peixin

(Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084)

Received 20 May 1998, revised manuscript received 20 November

Abstract Microstructure of $\text{P}^+-\text{Si}_{0.65}\text{Ge}_{0.35}/\text{P-Si}$ heterojunction internal photoemission (HIP) infrared detector with a stacked structure has been observed by using localization cross-section high resolution electron microscopy. The photo-sensitive region in the detector consists of 3 $\text{P}^+-\text{Si}_{0.65}\text{Ge}_{0.35}$ layers and 2 undoped Si(UD-Si) layers. The interface between $\text{Si}_{0.65}\text{Ge}_{0.35}$ and UD-Si is not sharp and has a transition area due to nonuniform diffusion of Ge atoms. The misfit stress on the interface is distributed gradiently in normal direction of it. Therefore the crystal defects and serious lattice deformations on the interface have not been observed. A defect area in the shape of inverted triangle exists in the edges of photo-sensitive region. The main types of the defects in the area are stacking faults and microtwins. The stacking faults are on $(1\ 11)$, and the thickness of the microtwins is about $2\sim 4$ lattice distance and the twin plane is $(\bar{1}\ \bar{1}1)$. The $\text{Si}_{0.65}\text{Ge}_{0.35}$ and UD-Si layers on amorphous SiO_2 step consist of polycrystals grown due to random nucleation, and are in the shape of waves.

EEACC: 7230C; PACC: 6865, 6116D

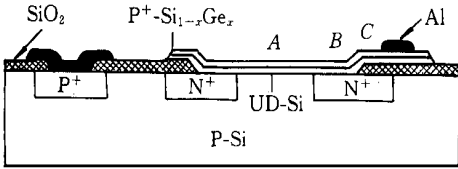


图 1 层叠结构的 $P^+-Si_{0.65}Ge_{0.35}/P-Si$ 异质结内光发射红外探测器横断面示意图

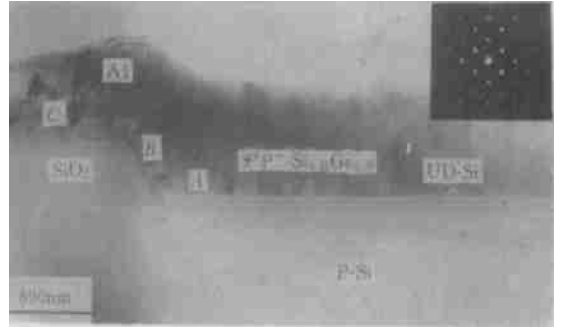


图 2 具有 3 层 $Si_{0.65}Ge_{0.35}$ 的 $Si_{0.65}Ge_{0.35}/P-Si$ 异质结内光发射红外探测器一端的横断面像

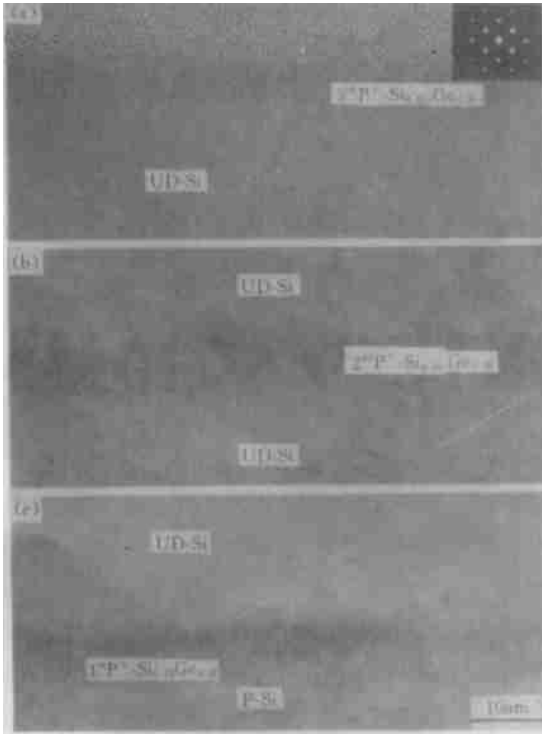


图 3 光敏区(A 区)中, $P^+-Si_{0.65}Ge_{0.35}/UD-Si$ 叠层的高分辨电子显微像

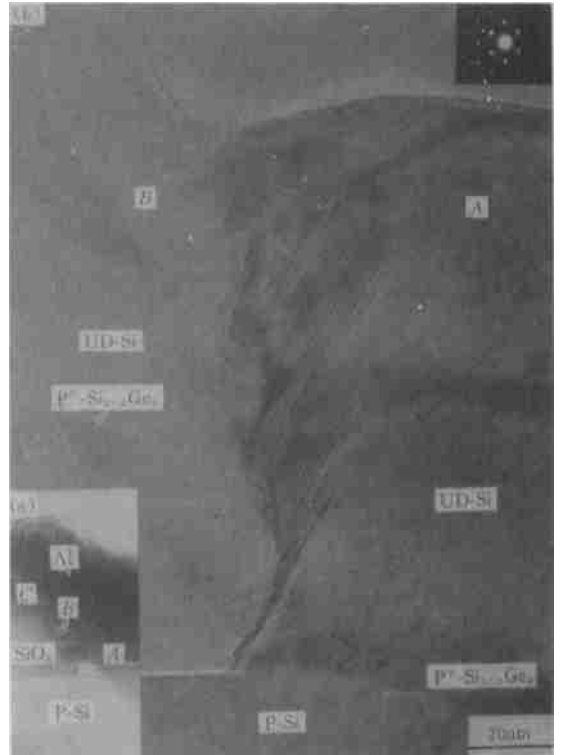


图 4 (a) 非晶 SiO_2 台阶斜面的 B 区的多层结构像;
(b) A 区与 B 区交接处的高分辨电子显微像