第37卷 第6期 物 理 学 报 Vol. 37, No. 6
1988 年 6 月 ACTA PHYSICA SINICA June, 1988

颗粒超导体 $Ba_2YCu_3O_{7-\delta}$ 的低温电阻特征

喻道奇 潘国强* 赵 勇 孙式方 陈祖耀* 张其瑞
(中国科学技术大学物理系)

1987 年 11 月 12 日收到

提 要

本文中研究了单相 $Ba_2YCu_3O_{7-\delta}$ 样品的低温电阻与外磁场、温度以及测量电流之间的关系. 结果表明,外磁场的大小、方向,以及测量电流的大小,显著地改变着样品的低温电阻行为. 从样品的颗粒结构特征对结果进行了讨论.

一、引 言

Ba-Y-Cu-O 体系的超导电性已得到了广泛的研究. 实验上已经发现[1-3],对于单相 $Ba_2YCu_3O_{7-\delta}$ 大块样品,尽管具有相当高的上临界场 ($H_{c_2}(0) > 100T$),但其临界电流密度却很低(液氮温度下无外磁场时临界电流密度仅为 $1100A/cm^2$). Larbalestier 等人[4]在研究中发现,单相 $Ba_2YCu_3O_{7-\delta}$ 的抗磁性在 10G 的外场下降低了 15—20%,测量出的临界电流密度比磁化电流密度低两个数量级. 赵勇等人[5]研究了单相 $Ba_2YCu_3O_{7-\delta}$ 样品电阻对磁场的依赖关系和伏-安特性,结果发现样品具有典型的颗粒超导体特征,电阻对外磁场呈非单调变化,并有明显迴滞. 赵勇等人[6]观察到 $Ba_2YCu_3O_{7-\delta}$ 在 T_c 附近 Hall 系数有一反常峰存在,认为同样与样品的颗粒结构有关. 从 Hall 系数实验结果他们推算出晶粒间界的载流子浓度比晶粒内低 10 倍. 进而他们认为造成单相 $Ba_2YCu_3O_{7-\delta}$ 具有较低的临界电流的原因在于晶界的弱超导性.

本文中系统研究了单相 $Ba_2YCu_3O_{7-\delta}$ 样品的低温电阻率与外磁场、温度及测量电流之间的关系. 结果表明,外磁场的大小、方向,以及测量电流的大小,显著地改变着样品的低温电阻率行为,考虑到样品的颗粒结构特征,作者认为,样品的低温电阻率大小主要取决于样品内超导晶粒间的类 Josephson 结的耦合状况. 这种耦合状况随外磁场、温度和测量电流的大小而改变,从而导致这类颗粒超导体的低温电导率的特征变化.

二、实 验 方 法

将 $BaCO_3$, Y_2O_3 和 CuO 按配比称量,充分研磨、混合后在空气中 900℃ 下加热 30 h,

* 应用化学系.

再次研磨后压片，在 O_2 气流中 930℃ 下退火 24h. X 射线衍射结果表明样品为很好的单相. 电阻测量结果表明样品的转变温度 T_c 为 90K，交流磁化率测量结果也给出样品在 T_c 附近呈现一很大的抗磁信号.

电阻测量采用标准的四引线方法. 样品的温度由经过标定的 Ge 电阻温度计检测.

三、结果与讨论

图 1 给出了在不同的外磁场下样品的超导转变曲线. 从图上可以看出，随着外磁场

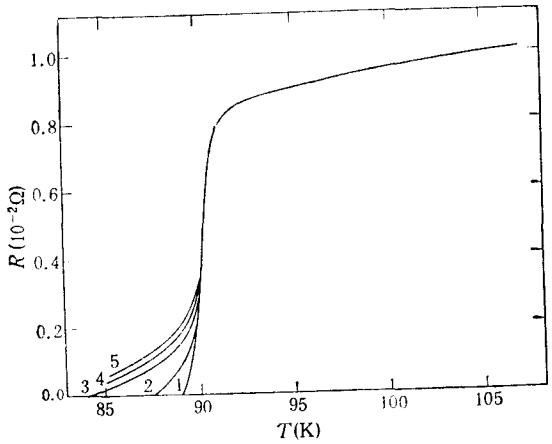

图 1　1 为 $H=0$; 2 为 $H=550$G; 3 为 $H=1100$G; 4 为 $H=1650$G; 5 为 $H=2200$G

从零加大，零电阻温度降低，转变宽度 ΔT_c 增大，而转变中点温度几乎不变. 对于颗粒超导体，中点温度由晶柱的超导电性所决定，因而受弱磁场的影响不大. 而零电阻温度取决于晶粒间超导结的临界温度，即使很小的外磁场，也足以破坏大量弱耦合的超导结，使之进入正常态，因此样品的零电阻温度降低，转变加宽.

图 2 给出不同温度下样品的电阻与外磁场之间的关系曲线. 在较低的温度下，曲线 *a*，随着外磁场增加，样品从超导态进入有阻态，电阻值随外磁场急剧增加，经过一峰值后下降，再经过一极小值后上升；降低磁场时，电阻曲线有一很大迴滞. 上述非单调变化和迴滞的特征，在大块 $BaPb_{1-x}Bi_xO_3$ 颗粒超导体中也曾观察到[7]. 改变温度，如图 2 中 a →

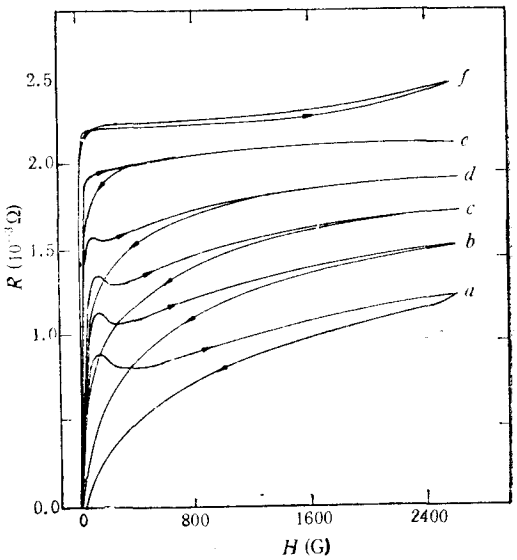

图 2　*a* 为 $T=79.5$K; *b* 为 $T=81.8$K; *c* 为 $T=83.6$K; *d* 为 $T=85.6$K; *e* 为 $T=87.6$K; *f* 为 $T=89.7$K

b → c → d → e → f，温度逐渐升高，可以看出，峰高相对逐渐变小至消失，峰位向低磁场方向移动，迴滞效应减弱，而相同磁场下对应的电阻值逐渐增大.

上述实验结果可以用颗粒超导电性加以解释. 在颗粒超导体中，超导晶粒之间依赖类 Josephson 结面实现弱耦合. 施加外磁场后，由于磁通的穿入部分结转为正常态而使样品最后进入有阻态. 当外磁场达到晶粒的下临界场 H_{c_1} 时，大量的晶粒进入混合态，原先聚集在晶粒间界上的磁通进入晶粒内部，而使得晶粒间界上的磁场减弱，这样部分已进入正常态的结又重新进入超导态，整个样品的电阻减小. 从上述分析立即可以得出，样品电阻曲线的极大值对应于晶粒的下临界场 H_{c_1}. 图 3 给出用这种方法得到单相 $Ba_2YCu_3O_{7-\delta}$ 样品的 H_{c_1}-T 关系. 进一步的分析结果表明，$H_{c_1}(T)$ 满足抛物线关系

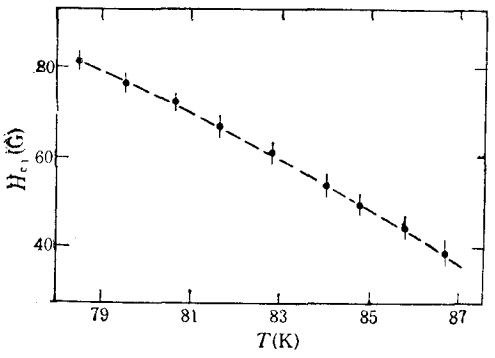

图 3

$$H_{c_1} = H_{c_1}(0)\left[1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^2\right],$$

其中 $H_{c_1}(0)$ 约为 500G. 由此我们推测 $Ba_2YCu_3O_{7-\delta}$ 属第 II 类超导体. 迴滞效应是由样品晶粒内部的大量缺陷所引起的磁通钉轧造成的. 随着温度的增加，由于导通的超导结数目逐渐减少，迴滞效应逐渐减小，而当温度接近 T_c 时，样品内部磁通流阻所造成的热滞后越来越显著，热滞后的效果使得迴滞曲线位于外磁场曲线的上方，如图 2 中的曲线 f，而磁通钉轧造成的滞后位于外磁场曲线的下方，图 2 中的 a,b,c,d,e. 从图 2 上还可以看出，随着温度的增加，由于导通的结的数目逐渐减少，因而相同的磁场下样品的电阻值随温度的升高而下降. 一定程度上反映了结的输运特征. 图 4 给出了单相 $Ba_2YCu_3O_{7-\delta}$ 样品的电阻曲线上极大值 $\ln R_{max}$ 与温度 T 的关系，电阻值已取对数. 从图 4 上看，$\ln\rho \sim T$ 呈直线关系，由此推知样品的峰值电阻与温度里指数关系，$\rho_{max} \propto e^{+kT}$，反映了

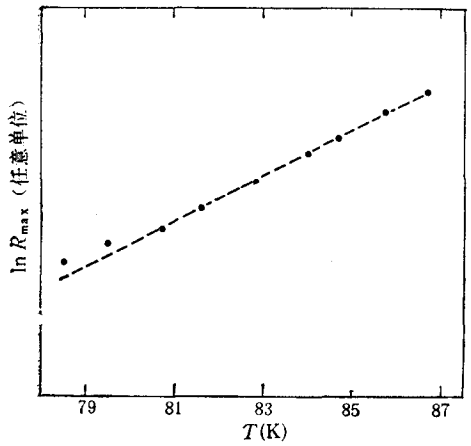

图 4

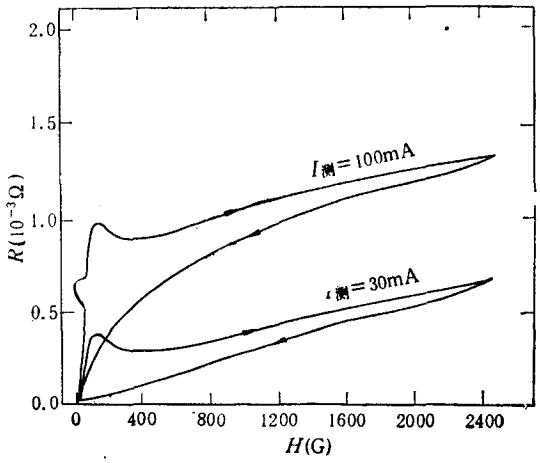

图 5

弱耦合的超导结具有类半导体特征.

图 5 给出了 $Ba_2YCu_3O_{7-\delta}$ 样品在不同测量电流下的电阻值 $R(H)$. 从图 5 上可以看出,在较大的测量电流下,样品的电阻值也显著增大. 这是因为较大的电流密度同样使得较多的超导结进入正常态,因此相应电阻值较高.

图 6 给出 $Ba_2YCu_3O_{7-\delta}$ 样品在外磁场方向分别平行和垂直于样品电流方向时的电阻测量结果. 从图 6 上可以明显看出,在纵场下($H/\!/I$)的样品,其内部构成超导回路的结平面倾向于垂直外磁场,因此与横场 ($H\perp I$) 相比, 磁通较难进入,超导结不易被破坏,而且纵场下不存在磁通流阻效应,因此,纵场下样品的电阻值小于横场下的值,极大值峰高相对降低,迴滞效应也较小.

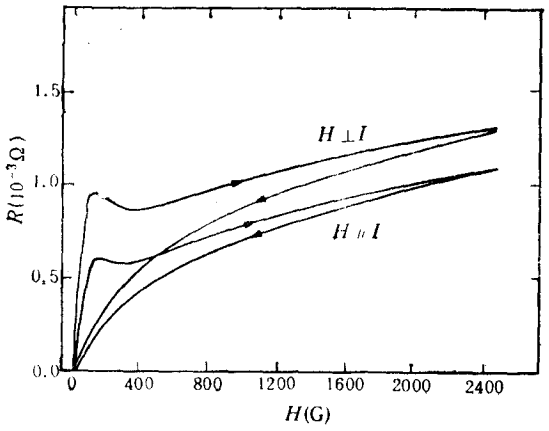

图 6

四、结　论

从上述实验结果可以看出,颗粒超导体 $Ba_2YCu_3O_{7-\delta}$ 低温电阻率主要取决于超导晶粒之间的超导结的耦合状况,随外磁场、测量电流等条件的不同而显著改变. 由此我们得出,弱耦合的超导结是造成 $Ba_2YCu_3O_{7-\delta}$ 大块样品低临界电流密度的直接原因. 作为超导强电应用的潜在材料,$Ba_2YCu_3O_{7-\delta}$ 的颗粒超导电性问题有必要作进一步的研究.

参　考　文　献

[1] C. G. Cui, S. Q. Cuo, S. L. Li, L. Chen, C. Dong, X. T. Xu, J. K. Liang, 预印本.

[2] S. N. Song, S. J. Hwu, F. L. Du, K. R. Poeppelmeier, T. O. Mason, J. B. Ketterson, 预印本.

[3] R. J. Cava, B. Batlogg, R. B. van Dover, D. W. Murphy, S. Sunshine, T. Siegrist, J. P. Remeika, E. A. Rietman, S. Zahurak, G. P. Espinose, *Phys. Rev. Lett.*, **58**(1987), 1676.

[4] D. C. Larbalestier, M. Daeumling, X. Cai, J. Seuntjens, J. McKinnell, D. Hampshire, P. Lee, C. Meingast, T. Willis, H. Muller, R. D. Ray, R. G. Dillenburg, E. E. Hellstorm, R. Joynt, submitted to *J. Appl. Phys.*

[5] Zhao Yong, Xia Jiansheng, He Zhenhui, Zhang Qirui, Chen Zuyao, Qian Yitai, Pan Guoqiang, submitted to *Phys. Lett.*

[6] Zhao Yong, Zhang Qirui, Kuan Weiyan, Xia Jiansheng, He Zhenhui, Sun Shifang, Chen Zuyao, Qian Yitai, Pan Guoqiang, *Solid State Commun.*, **64**(1987), 885.

[7] S. V. Zaltsev-Zotov and E. A. Protasov, *Sov. Phys. Solid State*, **26**(1984), 834.

CHARACTERISTICS OF THE LOW-TEMPERATURE RESISTIVITY OF GRANULAR SUPERCONDUCTOR $Ba_2YCu_3O_{7-\delta}$

YU DAO-QI PAN GUO-QIANG* ZHAO YONG
SUN SHI-FANG CHEN ZU-YAO* ZHANG QI-RUI
(Department of Physics, University of science and Technology of China, Hefei)

ABSTRACT

We have studied the relation between the low-temperature resistance of single phase $Ba_2YCu_3O_{7-\delta}$ and magnetic field, temperature and measuring current. The results show that the resistance behavior varies obviously with the strength and direction of the field as well as the measuring current. We suggest that all the results are associated with the granular structure of the sample.

* *Department of Applied Chemistry.*

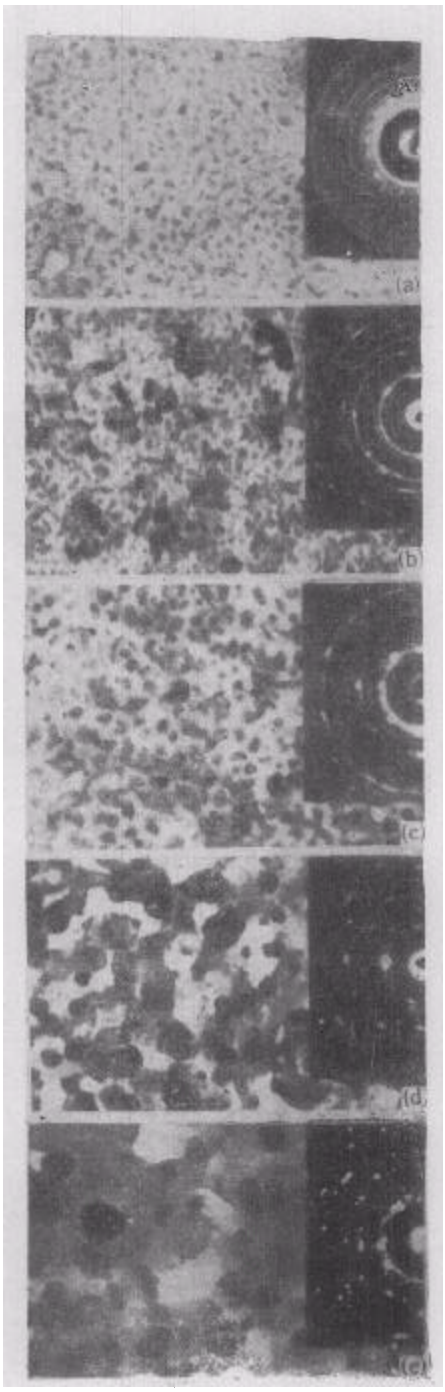

图 1　单层制备的 Ag + BaO 薄膜
放大率约为 21 万倍

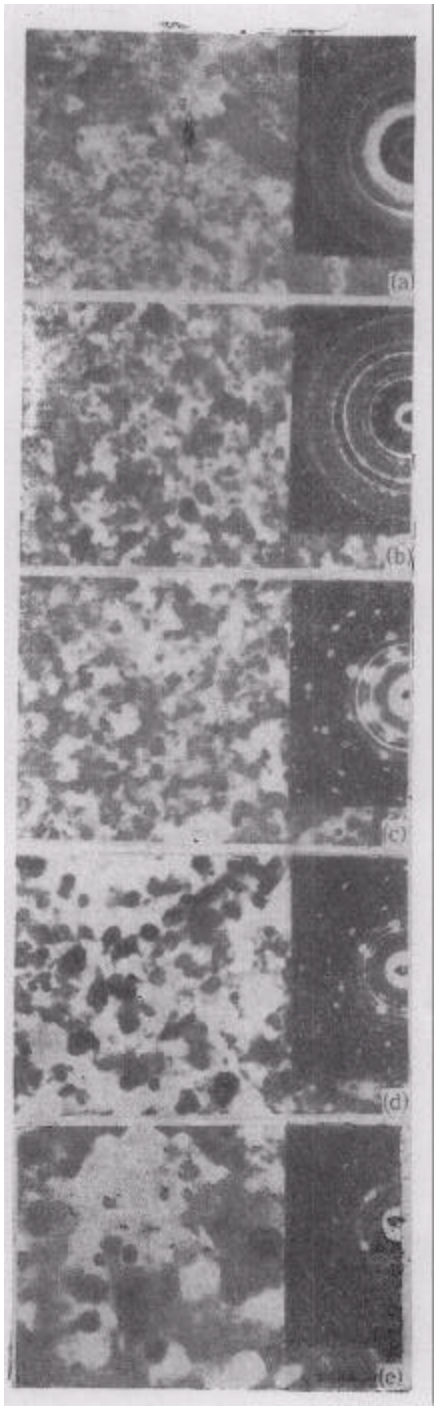

图 2　多层制备的 Ag + BaO 薄膜
放大率约为 21 万倍

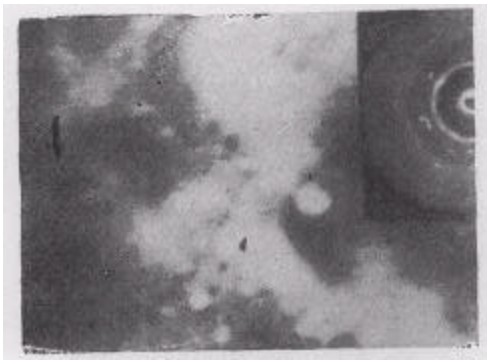

图 3　BaO 薄膜的形貌及衍射图
放大率 28 万倍

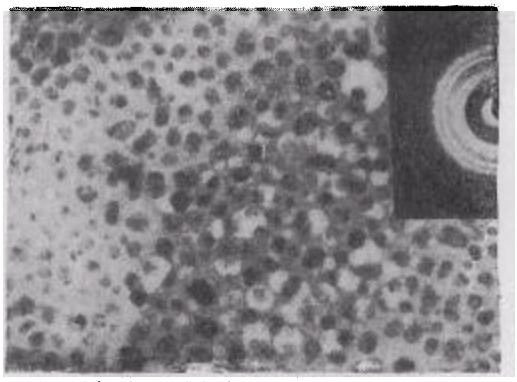

图 4　图 3 BaO 膜蒸 Ag，使透过率下降 50% 的 Ag + BaO 薄膜放大率 28 万倍

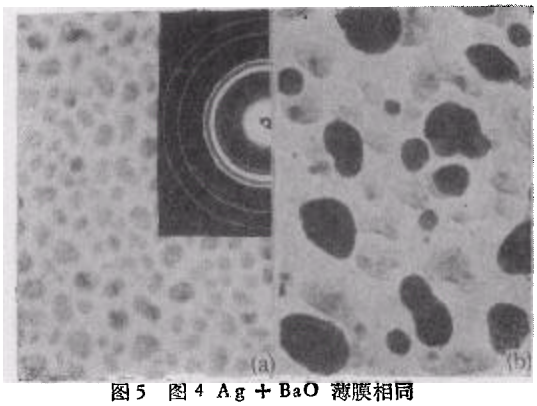

图 5　图 4 Ag + BaO 薄膜相同 Ag 量的 Ag 膜

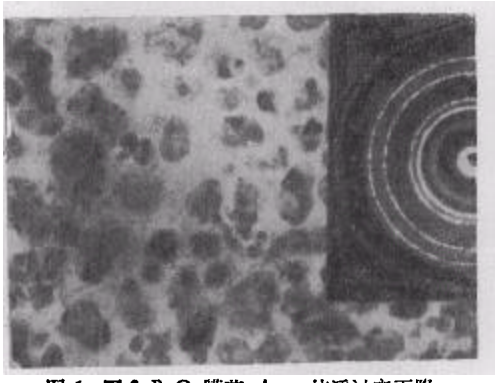

图 6　图 3 BaO 膜蒸 Ag，使透过率下降 90% 的 Ag + BaO 薄膜放大率 28 万倍

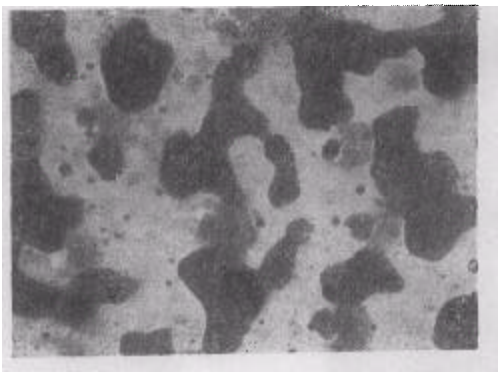

图 7　图 6 Ag + BaO 薄膜相同 Ag 量的 Ag 膜　在 475K 下烘烤；放大率 28 万倍

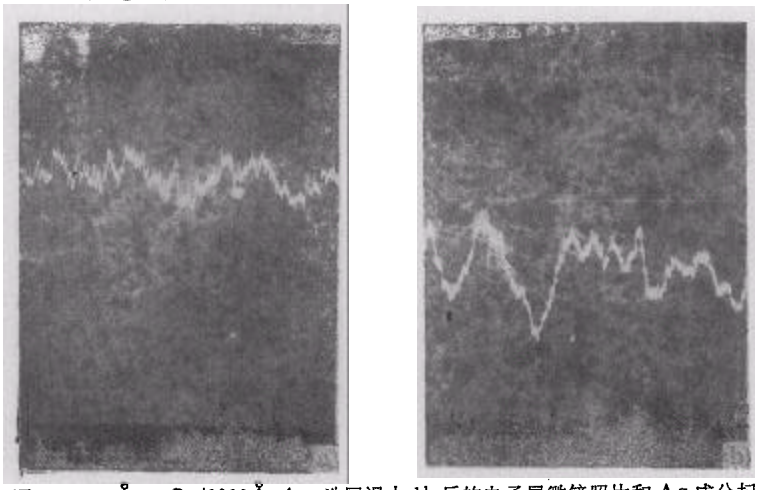

图 4　2000Å a-Ge/2000Å Ag 迭层退火 1h 后的电子显微镜照片和 Ag 成分扫描

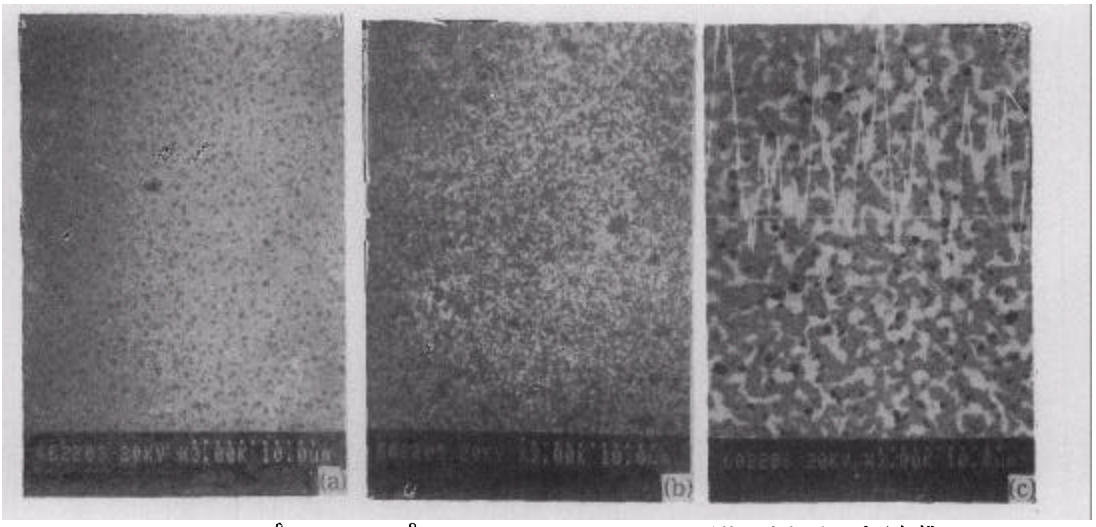

图 5　2000Å a-Ge/1000Å Ag 迭层退火 1h 后的电子显微镜照片和 Ag 成分扫描

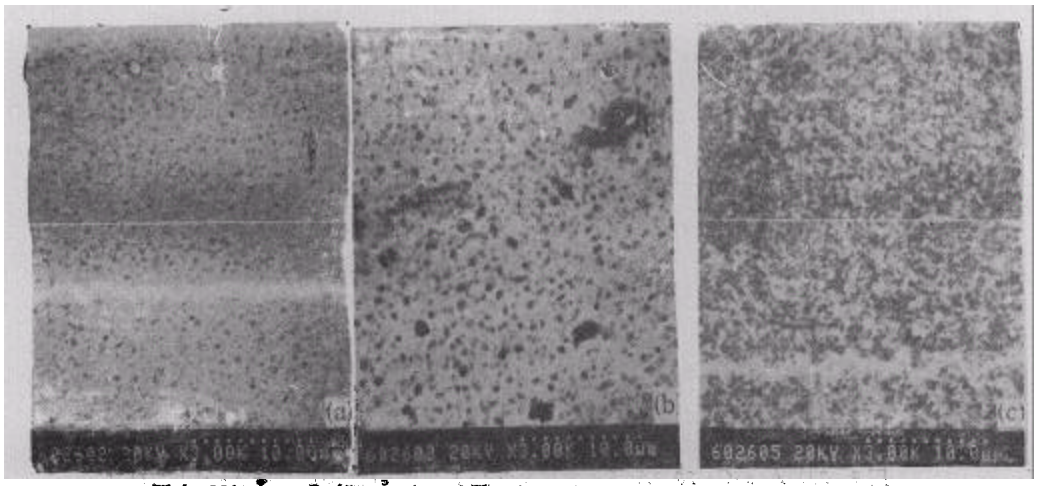

图 6　2000Å a-Ge/500Å Ag 迭层退火 1h 后的电子显微镜照片和 Ag 成分扫描

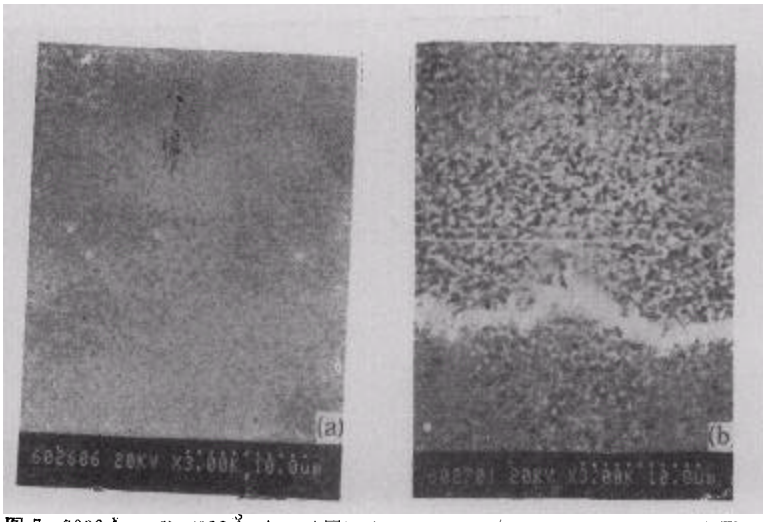

图 7　2000Å a-Ge/100Å Ag 迭层退火 1h 后的电子显微镜照片和 Ag 成分扫描