

碲镉汞材料及工艺控制的分析方法

杨得全 范垂祯
(兰州物理研究所)

内容提要: 随着碲镉汞红外器件的小型化、高品质化和性能的提高,对原材料的纯度、器件工艺质量控制方法提出了更高的要求。就分析方法而言,不仅要求有高的定量分析精度,同时要求分析方法对杂质元素的分析范围广(多元素分析)、元素的探测灵敏度高。对器件工艺控制分析来说,除了基体元素成分、杂质元素的定量分析外,还要求分析方法能在横向和纵向分析,并有相当的空间分辨率。就上述要求给出了碲镉汞材料提纯、CMT(碲镉汞, $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$)晶体生长及器件工艺控制分析的主要分析技术方法、特点及其进展。讨论了基体元素定量分析的精度,痕量元素定量分析的能力、灵敏度及其进行深度剖面分析的深度分辨率。

主题词: 碲镉汞、主元素、杂质、定量分析。

CdTe 和 $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (CMT)化合物半导体是制备高品质 γ 射线探测器、光电调制器等光电器件和红外探测器的主要材料。

一般认为^[1],要获得高质量 CdTe 或 $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ 晶体材料,其 Cd 、 Te 材料的纯度必须在6N(即杂质浓度总量低于 10^{-6})以上,而 Hg 的纯度应在7N(杂质含量小于 10^{-7})以上。目前, Cd 和 Te 的提纯多采用区域熔炼法^[1-2], Hg 的提纯则多采用多级真空蒸法^[1-2]。CMT的制备可分为两种方法。一类是块材料的制备,另一类是外延法。直到70年代后期,CMT的制备技术仍主要以块材法为主,其中包括铸条处理(CQA)法,结晶热处理(CRA),富 Te 布里曼法,移动加热器法(THM)。对块材料的分析来说,涉及以下三个主要问题。首先是生长单晶的材料中杂质种类、含量和形成结晶棒(球)的痕量杂质元素种类和含量。其次是在材料提纯、晶体生长工艺中,如刻蚀清洗和各种用于元素提纯、CMT晶体制备的容器带来的污染及其提纯工艺参数优化选择和控制。最后是CMT及其器件相关材料主体元素浓度的定量确定。

70年代末期和80年代初期开始发展了碲镉汞的外延技术。其中包括富 Te 和富 Hg 条件下液相外延(LPE)技术,MOVPE(金属有机气相外延)技术和分子束外延(MBE)技术。

1993年6月29日收到,作者的邮政编码730000

良、结构合理、最大工作总压力达到0.1Pa以上,已基本具备用于溅射镀膜等在较高压力下工作的工艺气氛的原位质谱分析。

参考文献

- 1 胡汉泉,王迁主编.真空物理与技术及其在电子器件中的应用(上册).北京:国防工业出版社,1982
- 2 Werner D E, Linssen A J. A study on the maximum tolerable Pressure in a residual gas analyzer. J. Vac. Sci. Technol., 1974; 11(4): 843
- 3 康小录.一组四极质谱计的高压力特性.真空与低温,1993; 12(3)

虽然外延材料与块材料的纯度基本相一致,但对外延材料来说,对分析首先的要求更为苛刻。例如,外延材料的厚度很薄,典型的厚度为 $3\sim 25\mu\text{m}$,有时可薄至几十毫微米。对外延材料的分析不仅要求分析 CdTe 或 $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ 、 $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ 和 $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ 基体,而且还要分析 Al_2O_3 、 InSb 、 GaAs 以及最近热门的 Si 或 GaAs 异质结材料。

光导器件的特性在很大程度上取决于材料,它需要高纯 n 型CMT材料。80年代初期,兴起了结探测器,如光伏器件和MIS结构,阵列探测元,大小在50平方微米内。最近,CMT异质结器件受到了重视。这些新型器件工艺技术的发展对材料的分析提出了新的要求。主要反映为:较高空间分辨、深度剖面定量分析及其表面和界面分析。不可否认,传统的分析方法,如原子吸收光谱法、原子发射光谱法、火花源质谱及其电子微探针法等技术,在CMT材料的分析中发挥了巨大的作用^[3-6]。但是,随着红外技术发展的需要,这些方法已无法满足材料和器件发展的要求。目前,CMT材料的分析已由传统的体材料分析拓宽为包括现代表面分析技术在内的综合分析方法。

一、材料和器件工艺控制对分析方法的要求

在 Cd 、 Hg 、 Te 及CMT材料及其工艺控制分析中,对分析方法的具体要求是:(a)杂质元素、污染元素的鉴别和定量分析;(b)基体元素的定量分析。表1中则给出了相应材料评价中对分析方法的要求。

表1 碲、镉、汞和CMT材料、器件工艺控制对分析方法的具体要求

1.材料	
(1) Cd 、 Te 、 Hg 原材料、提纯后的材料	
(2) 生长块状 $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, 包括 X 的纵横向分布	
(3) 在 CdTe 、 $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ 、 $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ 、 Al_2O_3 、 CdTe GaAs 或 Si/GaAs 上延生长的 $3\sim 30\mu\text{m}$ 厚的 $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$	
(4) $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{Cd}_y\text{Hg}_{1-y}\text{Te}$ 结或基底	
(5) $\text{GaAs}/\text{CdTe}(\sim 3\mu\text{m})/\text{Cd}_{0.2}\text{Hg}_{0.8}\text{Te}/\text{CdTe}(< 1\mu\text{m})$ 多层异质结	
2.器件工艺控制	
(1) 单胞高纯 $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, 约 $50\times 150\mu\text{m}$	
(2) 多胞: 单个 $50\mu\text{m}\times 50\mu\text{m}$	
(3) 多阵元: Sprite阵元: $8\times 50\times 50\mu\text{m}$	
(4) PV光二极管, 阵元为 $50\mu\text{m}$	
(5) p - n 结: 离子注入、离子束混合	
(6) 未来的 Si/GaAs 结	
3.对分析方法的总技术要求	
(1) 合金 $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ 的主成分均匀性	X 值误差不大于 ± 0.001 对 Cd 应不大于 $\pm 0.5\text{at}\%$
(2) X 值深度的剖面分析	深度分辨优于 $\pm 0.1\mu\text{m}$
(3) 横向分辨率	不大于 $1\mu\text{m}$
(4) 本底材料电活性杂质浓度 (ND-NA)	$(1\sim 5)\times 10^{14}$ 原子/ cm^3 百万分之 $0.003\sim$ 百万分之 0.02
(5) 掺杂浓度	$3\times 10^{15}\sim 3\times 10^{18}$ 原子/ cm^3 百万分之 $0.1\sim$ 百万分之 1.0

注: ND为施主杂质(如 Al , In , Cl , Br 等)浓度, NA为受主杂质(如 Na , Li , Cu 及 Hg 空穴等)浓度

由表1可知,对 $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ 中 X 值的分析精度要求为 ± 0.001 。也就是说,对一个 $X=0.2$ 的CMT,要求的Cd的分析精度为 $\pm 0.5\%$ 。而对电活性杂质浓度的分析测量,单个元素的含量必须在十亿分之几数量级。因为高品质的光导器件要求施主浓度 $\leq 5 \times 10^{14}/\text{cm}^3$ (~ 20 十亿分之几)。对均匀块材料来说,传统的分析技术除了掺杂浓度分析和异质结构分析外,尚能勉强满足这一要求。在深度剖面分析中,要求深度分辨优于 $0.1\mu\text{m}$ 。

新近发展的异质结对原位区域分析提出了新的要求。这些要求包括不同结构CdTe、 $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Te}$ 、 $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ 和CMT在 Al_2O_3 、GaAs/Si及CdTe、 $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ 层中 X 值的定量分析。其中对 X 值的分析要求是对晶体层中晶格不能失配。但对器件结构的分析来说,最麻烦的问题恐怕要数在 $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ 大小,深度不超过 $10\mu\text{m}$ 区域的主成分和微量杂质元素的分析。

二、碲、镉、汞和CMT材料及其工艺控制的分析方法

对Cd、Te、Hg金属来说,主要分析杂质元素种类和其它含量,以及工艺过程的污染。但对CMT材料,由表1可知,对分析的要求较为复杂。目前尚不存在一种分析技术能够完成上述全部要求。个别一些现代表面分析技术,如二次离子质谱(SIMS)则能解决CMT分析中的许多问题。

1. 主体元素的定量分析

(1) 红外透射, 原子吸收, X射线荧光分析

对CMT材料的分析首先要完成的是确定其合金元素的化学成分。CMT对待测的红外辐射具有吸收特性。在大气环境条件下使用红外透射技术时,对 $3 \sim 5\mu\text{m}$ 和 $8 \sim 14\mu\text{m}$ 应是红外透过的。这个特性要求 $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ 的 X 值分别为0.3和0.2。在实际应用中,对探测器材料的选择并不以最终的红外透射特性来决定合金的组元浓度;而是以探测元的红外透射特性和红外截止波长位置为准。因此,就由此引出一个定标的问题。这是因为红外截止波长受温度的影响,同时温度影响其表面反射率和干涉效应。此效应对表面为薄膜的情况尤为严重。此外,由于器件的常规工作温度为77K,为此需要校准室温和77K温度的截止波长。但对一个材料科学家来说,重要的是了解所选择的材料组元浓度,而且当知道 X 光值时,还需要搞清楚材料在横向和深度方向的均匀性。所以,重要的是要了解 X 值随室温和77K时的截止波长的变化关系。对薄片红外透射的测量可用一个自动光谱仪,如Edinburgh仪器在普通的环境下进行,它可以提供整个薄片的截止波长图。

使用火焰原子化法可在通用的原子吸收光谱仪上对CMT样品进行定标。对于元素Cd这种方法的重复性优于 $\pm 0.2\%$ 。使用合适的标准样品,其精度也可达这个数量级。因为确定 X 值时要测量汞的浓度($X = C_{\text{Cd}} / (C_{\text{Cd}} + C_{\text{Hg}})$)。由此, X 值的测量精度下降为 $\pm 0.3\%$ 。

X射线荧光技术(XRF)可用来测量一个精心制备的CMT薄片的 X 值。使用短波辐射后穿透深度可达 $50\mu\text{m}$,用2mm的狭缝可使 X 值的精度达 $\pm 1\%$,用3mm的狭缝则可使 X 的测量精度达到 $\pm 0.2\%$ 。但如使用长波辐射源,其穿透深度约为 $3\mu\text{mm}$,狭缝宽度为2mm时, X 值的测量精度下降为 $\pm 2\%$ 。表2中列出了上述几种分析方法测量 X 值的精度比较。

(2) 电解液电反射法(EER)

Raccach和Lee于80年代初期首先发展了电解液电反射法(EER)测量MCT各层中 X 值及其深度剖面分析的可能性。当置于电解液中的样品两端施加可调制电场后,调制电场的变

表2 几种比较成熟的分析方法测量
Cd_xHg_{1-x}Te中X值的比较结果

方法	精度	空间分辨率
红外反射法	±0.003	较差
原子吸收谱	±0.001	—
X射线荧光谱		
固体	±0.002	很差
液体	±0.0003	—
电解液电反射	±0.002	较差
密度法	±0.001	较差
电子探针法	±0.0035	较高
卢瑟福背散射谱	±0.001	高

化而改变样品表面反射光的强度,并随入射光的波长不同而变化。对于反射光,直流信号正比于反射率,而交流信号正比于调制了的反射率 ΔR 。根据 $\Delta R/R$ 值及线宽可确定X的变化。最近的研究结果证明,EER在测量X值时其重复性优于±0.002,但要测量X的绝对值还需标准样品。

(3) 卢瑟福背散射谱(RBS)

RBS是一种通过高能离子(MeV)与样品表面层相互作用而进行能量分析的分析技术。RBS定量分析时并不需要定标。就样品的浅表层来讲,RBS对X值的分析精度可达±0.001。一般情况下多采用垂直入射法。

但要想获得比较好的深度分辨,可采用斜入角。这种技术在评价中间扩散效应和界面特性时很有用。

(4) 俄歇电子谱(AES)和X射线光电子谱(XPS)法

80年代初,Jacob等人曾用AES和XPS研究了MCT材料表面组分的定量分析问题^[6]。实验结果表明,在超高真空条件下,MCT的AES分析中存在两个问题:一是表面Hg元素的严重挥发(贫Hg);第二是MCT材料表面Ar⁺离子溅射效应较为强烈,给定量分析带来了困难。由这两个问题给X值带来的分析误差可能达100%。但与上述其他方法相比,这种方法具有十分高的空间分辨率(深度分辨可达几个纳米,纵向分辨能达几十纳米)。我们曾对MCT材料X值的AES定量分析问题进行了广泛的实验研究^[10],采取一定的方法和措施后可使AES定量分析的精度控制在5%以内,从很大程度上消除了离子束溅射和电子束分解效应。

2. 杂质及掺杂元素的定量分析

(1) 原子吸收光谱

原子吸收光谱是分析CMT痕量杂质元素及其掺杂元素的最有效的方法之一。Grainger和Gale公布的结果说明了石墨炉原子吸收光谱(GFAAS)在CMT分析中的能力和具体分析结果。使用固体样品时传统的方法就能获得十亿分之几数量级探测能力。基体元素Hg的挥发性是制备CMT的一个缺点,但对分析来说,这又是一个优点。这种方法在SSMS(火花质谱)、SIMS(二次离子质谱)分析掺杂元素定量分析定标中发挥了很大的作用。GFAAS还用于分析溶液样品。事实上,这种方法更适合精确测量高掺杂或高杂浓度杂质元素的。因为用溶质法定标较为简单。由于加入石墨炉中的样品量较少,这种方法的灵敏度降低了。但5 μ L的溶液中含有0.5mg溶质,具有百万分之几毫克的灵敏度,即可测到10¹⁵原子/cm³的浓度。表3中给出了原子吸收光谱法探测分析CMT的结果。这些结果,现在一般都能实现。

这是因为采用了再蒸流过程纯化酸和化学试剂。当然,只要精心的制作样品,也可以用这种方法获得表面、体内及外延层界面区域的平均杂质。掺杂量在10¹⁶原子/cm³级时还可获得样品表层近似的深度剖面。很显然,这样的方法不仅技术实现上有极大的困难,而且其结果的近似性与实际杂质分布几乎没有多大参考价值。而且这种方法分析的元素也仅限于正

表3 石墨炉AAS分析CMT的结果

GFAAS探测极限($\times 10^{18}$ 原子/ cm^3) ^①		
元素	固体样品	液体样品
Al	30	400
Si	30	400
Cr	10	150
Mn	0.5	10
Fe	5	50
Co	5	100
Ni	10	200
Cu	10	150
Ga	20	300
As	—	200
In	600	300
Sb	300	150
Ag	1	—
Au	10	30

① 1×10^{18} 原子/ $\text{cm}^3 \sim$ 十亿分之三表4 CMT材料中杂质元素的LSMS和SIMS分析比较^①

	LSMS	SIMS
杂质	1×10^{18} 原子/ cm^3	1×10^{18} 原子/ cm^3
Li	1	1
Na	1	10
K	1	2
R	10	70
F	10	—
Cl	20	90
Br	20	40
Al	20	8
Si	20	30
P	20	1000
Cu	500	1000
Ag	20	40000
Au	10	1
Cu	20	4
In	10	4
As	10	1000
Sb	20	200
Cr	10	0.6
Fe	—	10

①以 C_2^+ 离子作为一次束

电性元素。

(2) 火花源质谱(SSMS)

在过去很长一段时间内,人们一直将火花源质谱看作是分析CMT半导体原材料的最有效的半定量分析方法。整个70年代,这种技术作为主要手段用于材料工艺中污染杂质的确定。早期大多数抱怨这种分析技术的精度太差,而且可重复性也不好。目前在分析半导体材料时已比较好地克服了上述不足。SSMS的主要优点是具有很高的灵敏度(可达十亿分之一),有比较接近的元素灵敏度,其典型值在3倍因子以内,但碱金属是个例外。此外,这种技术在好几个数量级浓度变化范围内具有良好的线性响应性。在CMT分析中,大约有23种基体元素同位素处于以双荷、三荷离子态。同时,主成分相对高的挥发性抑制了Te原子的电离效率,所以如以Te离子做为内标,可使元素的灵敏度提高10倍因子,使用掺杂晶体样品定标,SSMS可进行定量分析。

(3) 激光扫描质谱(LSMS)

LSMS是CMT材料分析的重要手段之一。LSMS的使用被认为是CMT材料分析技术的一个发展和创新。它是一种高性能荷质比的分析方法。LSMS的主要优点是在整个质量数范围内大部分元素的灵敏度近似相等,且明显的降低了双荷离子碎片的数,使多荷离子峰在谱图中消失。结果是明显地改善了谱的可确认性和可比较性。此外,LSMS还增强了部分元素的探测灵敏度。从增强电离效率来讲,LSMS比SSMS增强几乎两个数量级。

对于CMT中的大部分杂质元素,LSMS的探测能力可达 1×10^{14} 原子/ cm^2 (见表4),也可直接用于外延层的分析。由于它的探测深度分辨约为 $0.5 \mu\text{m}$,所以,LSMS可用于“表面”分析,一定深度内的体和界面分析。在绝缘体、不规则表面和痕量元素分析方面,LSMS明显优于SIMS,但是,LSMS

的深度分辨低于 $0.5\mu\text{m}$,所以在深度剖面分析方面无法与SIMS相比。

(4) 二次离子质谱(SIMS)

SIMS是一种多用途的分析技术。它能够处理材料及其工艺质量控制过程中的广泛问题, SIMS不仅能够确定出杂质种类、含量, 而且能够出其元素在样品中的分布, 具有良好的空间分辨本领。

最初一段时间内, 许多人以为SIMS只是一种不能定量的分析技术, 与LSMS不同, 对大多数元素来说, 灵敏度差别较大(见表4)。如果采用合适的标样, 如用离子注入定标, SIMS同样能够给出有价值的, 比较可靠的定量数据。早期一段时间内, SIMS标样多采用原子光谱法分析。近年来大量采用离子注入定标, 提高了定量分析的精度和可靠性, 而且分析的元素范围广。

所不幸的一点是高性能SIMS仪器结构复杂, 成本费用太高。目前最好的商用SIMS仪器价格高达一百万美元。在SIMS仪器中有两种基本类型: 一种是离子探针型。如Atomika公司生产的SIMS仪器, 可进行静态和动态SIMS分析; 另一种是离子显微镜型, 如法国Cameca公司生产的IMS-3f, IMS-4f。这类仪器不仅能进行动态SIMS元素分析, 而且能获得表面显微离子像。在深度剖面分析中, 弧凹边缘效应可采用电子闸门技术。这两类仪器均有很好的深度分辨本领和很高的元素探测灵敏度。IMS-3f和IMS-4f是一种通用的高性能SIMS仪器, 它采用较高的加速电压来获得高的二次离子收集效率。采用磁偏转分析器就会有高的质量分辨本领。Atomika公司的SIMS仪器(以及Pekin Elmer公司的SIMS仪器)则采用精心设计的四级分析器和超高真空系统。它的优点是可获得低的H、C、N、O、Cl等的背景干扰, 这两类仪器在近十年来性能已有了很大的提高, 尤其是在数据收集、处理和可靠性方面取得了较大的发展。

SIMS分析CMT材料时溅射速率很高。在通常条件下, CMT的离子剥蚀离子速度是Si、InP和CaAs的5倍。溅射时表面可能由于加热的缘故而引起Hg的大量损失。但实验结果说明, 这个效应并不影响CMT的深度剖面分析。虽然CMT的溅射速率是CdTe的 $4/3$ 倍, 但二者的SIMS分析的相对灵敏度因子却一样。

在Cd、Te或CMT的SIMS分析中, Cd和Te双荷离子峰很强, 并且严重的干扰了Mn、Fe、Ni、Cu和Zn离子的测量。这个问题可通过向高能端移动能量窗口来克服。此方法对Cu来说比Fe要差一些(可测到 2×10^{15} 原子/ cm^2)。SIMS在CMT中的主要应用有以下几个方面:

a. Cu元素的分析: CMT中Cu是主要有害杂质之一, 对Cu元素的分析具有重要的意义。由上述所述, 在正二次离子质谱中, Cu^+ 受到 Te^+ 离子峰的严重干扰。一种措施是采用 Cs^+ 作为入射离子的负二次离子质谱, 但在质荷比为33和35处, Cu峰与CO、Cl峰间的差别仅为0.034个质量数。采用IMS-3f和IMS-4f则很容易将这两个峰分辨开来, 这样Cu元素的探测极限可以下降两个数量级, 达到 2×10^{14} 原子/ cm^2 。

b. 基底污染: 层状结构的SIMS深剖面分析结果指出, 一些常见杂质如碱金属、Si等元素在其界面元素现出峰值。通过横断面上二次离子像分析指出, 这些杂质的富集在一定条件下可能扩散于多层材料内部, 导致不良后果。

近年来, 美国休斯实验室的Wilson及Steven教授领导的小组就SIMS在CMT材料的定量分析研究取得了一系列的结果^[7,8], 包括离子注入法元素相对灵敏度因子的确定, 二次

离子发射过程的研究、深度剖面分析、多荷离子峰的干扰及其防护措施等。这些研究成果不仅对实际CMT材料的定量SIMS分析有一定的指导意义,而且对固体材料表面二次离子发射物理基础研究亦具有重要的参考价值。

三、小 结

综上所述可知,在Cd、Te、Hg及CMT材料与器件工艺控制分析中,没有一种方法能够承担所有的工作。相对来说,传统的体分析方法有比较高的分析精度,分析结果比较可靠,方法本身比较成熟。而现代表面分析方法,如AES、XPS(X射线光电子谱)、SIMS等定量分析精度较差。随着CMT红外器件的小型化、高可靠发展的需要,CMT材料及器件工艺质量控制分析对AES、XPS、SIMS等表面分析的要求和依赖性已经显得越来越重要了^{8,9}。所以,现代表面分析在CMT中的应用研究是今后一段时间内发展的重点之一。

参 考 文 献

- 1 Hirsch H E, Liang S C, White A G. Preparation of high -purity Cadmium, Mercury, and Tellurium, in: Semiconductor and Semimetals. 1981, 18, Academic Pre. Inc. 21~45
- 2 Yoshikawa M. The behavior of oxygen in CdHgTe, J. Vac Sci. Technol., 1985, A3(1): 153~155
- 3 Jacob W L. Identification and investigation of impurities in undoped $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, J. Solid State Chem., 1975, 15(1): 90~101
- 4 Dittmar G. Homogenitätsuntersuchungen und bestimmung der molarenkonzentration x an $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ mit Hilfe der elektronenstrahl-mikrosonde, Kristall und Technib. Bd., 1977; 6, 631~638
- 5 Nitz H M. Quasisimultaneous SIMS, AES, XPS and TDMS study of preferential sputtering, diffusion, and Mercury evaporation in $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, Surface Science, 1981, 104: 365~383
- 6 Wilson R G. Secondary ion mass spectrometry sensitivity factors versus ionization potential and electron affinity for many elements in CdHgTe and CdTe using oxygen and cesium ion beams, J. Appl. Phys., 1988, 63(10), 5121~5125
- 7 Wilson R G, Stevie F A, Magee C W. Secondary ion mass spectrometry-a practical handbook for depth profiling and bulk impurity analysis, 1989 John Wiley & Sons
- 8 Wilson. CdHgTe Surface and defect study program, AD-A166749, 1985
- 9 Stevenson D A. Diffusion and defect characterization studies of CdHgTe, AD-A162644, 1985
- 10 杨得全. “ $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ 的AES定量分析”(待发表)