

# 从高能物理学的发展看北京正、负电子对撞机

黄 涛

(中国科学院高能物理研究所)

## 摘 要

北京正、负电子对撞机是我国第一个高能物理实验基地。它的能区适合于彗粒子物理的深入研究。本文从目前国际高能物理学的进展展望了北京正、负电子对撞机进行物理研究的可能前景。指出北京正、负电子对撞机做出有国际影响的物理工作有三个必要条件：加速器的高亮度、谱仪的高探测效率、很高的数据处理能力。此外，还介绍了北京正、负电子对撞机可作为同步辐射装置用于科学技术的研究和发展。

## 一、北京正、负电子对撞机工程

正、负电子对撞机是进行高能物理研究的一个重要装置。北京正、负电子对撞机工程是我国第一个高能物理实验基地，也是我国科学技术现代化史上的一项重大工程。

自1984年10月7日开工奠基以来，经过近三年的奋斗，土建工程已完工；在1986年就开始了加速器的部分安装工作，其直线加速器的正电子产生部分已调试成功；储存环的安装即将开始；探测器的漂移室、簇射探测器、飞行时间探测器的磁体的机械加工都已结束。预计在1987年底出来，1988年下半年可以开始北京谱仪的总体安装和调试。总之，这一工程的各个主要组成部分都基本上按计划顺利进行，可望在1988年底实现正、负电子对撞，并着手进行高能物理实验研究。

这项国家重点工程占地面积一百余亩，共包括五个主要组成部分：(1)正、负电子直线加速器。它产生并加速正、负电子，是储存环的注入器；(2)储存环。它将正、负电子储存在圆圈内，并进一步加速实现对撞；(3)探测器(北京谱仪)。它用来鉴别反应粒子种类，定出电荷、动量、能量、径迹和自旋，从而进行高能物理实验

研究；(4)同步辐射实验区。它利用回旋电子束产生的同步辐射光进行多种学科的实验研究；(5)计算中心。它用来处理由探测器获取的大量实验数据。图1给出北京正、负电子对撞机的示意图。大量实验数据。图1给出北京正、负电子对撞机的示意图。

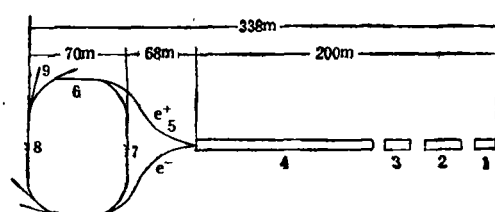


图1 北京正、负电子对撞机示意图

1. 30 MeV 预注入器；2. 120 MeV 直线加速器；3. 正电子靶；4. 正负电子直线加速器；5. 束流输运系统；6. 储存环；7, 8. 探测器；9. 同步辐射区

## 二、高能物理学——探索微观世界的最前沿

高能物理学又称粒子物理学，它是探索微观物理世界的最前沿的科学。人类对微观世界的探索包括两个方面：探索微观世界的物质结构；探索微观世界的运动规律。

二十世纪六十年代以前，人们对物质结构的认识是，宇宙万物是由电子、质子、中子、……

这些基本粒子组成的。到六十年代初，发现的基本粒子已经达到上百种，但是一系列的实验现象揭示了这些基本粒子并不基本，而是具有深入一层的内部结构，它们是由更基本的层子组成的。因此，现在“基本粒子”这一名词已不再沿用，而称为粒子。

对于众多的粒子，根据它们的性质可以分为三类：(1) 强子类。强子是参与强相互作用的粒子的总称，质子、中子、超子、 $\pi$ 介子、 $\rho$ 介子、K介子、 $J/\psi$ 粒子等都属于这一类。此类粒子最多，占了粒子总数的绝大部分。实验上所揭示的具有内部结构的“基本”粒子就是指这一类粒子，它们是由层子或层子和反层子组成的复合粒子。(2) 轻子类。这类粒子仅参与弱相互作用和电磁相互作用，不参与强相互作用，目前的实验并没有揭示它们具有内部结构，它们是电子、电子型中微子、 $\mu$ 子、 $\mu$ 型中微子、 $\tau$ 轻子、 $\tau$ 型中微子以及这些粒子的反粒子。(3) 媒介子类。它们传递相互作用，例如光子传递电磁相互作用，四年前发现的W和Z粒子是传递弱相互作用的中间玻色子，胶子是传递强相互作用的媒介子。

这样，层子(u, d, s, c, b以及它们的反粒子)、轻子(e,  $\nu_e$ ,  $\mu$ ,  $\nu_\mu$ ,  $\tau$ ,  $\nu_\tau$ 以及它们的反粒子)和媒介子( $\gamma$ ,  $W^\pm$ ,  $Z^0$ 以及胶子)应是处于同一层次的粒子，它们是(目前认识范围内)组成物质的最小单元。至今，在现有加速器能量范围内还没有直接的实验表明它们具有内部结构。从理论上将它们近似地处理为点粒子，这正象原子物理这一层次将原子核处理为点粒子一样。实验事实还表明每一种层子具有三种不同的颜色，因此连同反层子在内应有三十种，轻子有十二种，媒介子包括八种胶子有十二种。这些最小单元就是目前微观世界所探讨的对象。此外，理论上还预言了许多粒子如顶夸克、磁单极子、希格斯(Higgs)粒子、轴子以及各种超对称伴随子等。当前，高能物理学就是要研究微观世界中这些最小单元的性质以及如何结合又如何转化的相互作用规律。

### 三、粲粒子的发现和研究现况

1974年11月丁肇中和里克特分别发现了 $J/\psi$ 粒子。这种粒子的质量重(3.1GeV)，比普通强子重得多，而宽度窄，比普通强子所预料的要窄得多。为了研讨这样一个在原有理论中难以解释的 $J/\psi$ 粒子家族，十多年来产生了丰富的新物理思想和理论，也丰富了新的实验技术。高能物理学家称它为十一月革命。

前面提到强子是由层子构成的。在1974年以前大家已经知道有三种夸克：u(上)，d(下)，s(奇异)。由它们构成了上百种普通强子。然而， $J/\psi$ 粒子无法由u, d和s三种夸克构成。于是人们引入一个新的夸克Charm(从音和意中译为粲夸克)c，而 $J/\psi$ 就是由c夸克和它的反粒子组成的。就在 $J/\psi$ 粒子发现的十天后又发现了它的第一径向激发态 $\psi'$ 。十多年来实验上发现了它的家族中二十来个成员，例如 $J/\psi$ ,  $\eta_c$ ,  $\psi'$ ,  $\psi''$ ,  $\psi'''$ ,  $\psi''''$ ,  $\chi^0$ ,  $\chi^1$ ,  $\chi^2$ ,  $D^\pm$ ,  $D^0$ ,  $\bar{D}^0$ ,  $F^\pm$ ,  $D^*$ ,  $D^{**}$ 等等。这样丰富的谱都在很精确的程度上进行了研究，表明c夸克确实存在，而且粲夸克较重，它在 $\psi$ 家族的一系列束缚态中运动速度较小，可以用非相对论夸克势模型来描述。由薛定谔方程解出的能谱和性质很好地解释了目前的实验数据，这使我们能更好地认识夸克这一层次的结构和性质(见图2)。

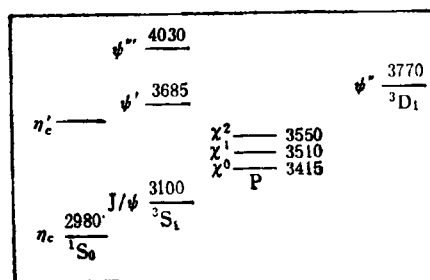


图2  $J/\psi$  家族能谱

美国斯坦福直线加速器中心(简称SLAC)在近几年来对粲粒子的性质进行了详细的研究。例如，仔细地测量了 $J/\psi$ 及其各个径向激

发态和轨道激发态的各种电磁辐射衰变过程以及它们的强相互作用衰变过程。又如，近两年来测量了D和F粒子的弱相互作用衰变过程，1986年已对F粒子的性质进行了精细的测量。到1986年为止，几年来他们亦已收集到大约三百万 $J/\psi$ 事例，测量了它的各种衰变道，还收集了近四万D介子事例，测量分析D介子的各种衰变道。1986年还积累了F介子的事例并获得了初步的结果。在收集到的这些事例的基础上进行了大量的数据分析，斯坦福直线加速器中心利用IBM3081-K计算机部分时间进行数据处理，所花费的计算机计算时间大约相当于五台Vax 11/780机器终年运行。

目前正在SLAC进行粲粒子研究的探测器是Mark III，虽然它已工作了近六年，但仍然有很多物理问题留待人们去解决。例如：

### 1. 胶子球的测定和研究

量子色动力学理论告诉我们，夸克之间的相互作用很强，它们是通过胶子传递相互作用的，而两个胶子或三个胶子可能形成束缚态，这种束缚态称为胶子球。 $J/\psi$ 粒子的电磁辐射衰变过程是探测胶子球的最佳实验室。1980年在Mark III上发现 $\psi'$ 粒子，人们认为它很可能是一个胶子球。然而，它不能与E粒子分开，这就是所谓的 $\psi'/E$ 之谜。六年的实验测量并没有解此谜，需要更多的事例数，只有获取更多的事例数才能解释这一能区的复杂结构。除了 $\psi'$ 粒子以外， $\theta$ 粒子， $g_T, g'_T, g''_T$ 也可能是胶子球。 $g_T, g'_T, g''_T$ 是在强子反应中观测到的，在 $e^+e^-$ 对撞实验中还未观测到。总之，尽管 $J/\psi$ 的辐射衰变确是研究胶子球的理想实验室，然而要想肯定地说发现了的粒子态就是胶子球是很困难的。原因来自两方面：一是由于人们并不能确切地知道胶子球的质量谱，无论是格点规范理论还是口袋模型都只能给出质量范围在1—3GeV，实验上很难调准谱仪精确地找到胶子球；二是在2GeV能区附近具有很复杂的结构。例如，有超过26个夸克和反夸克的束缚态可能存在，而目前只发现了一部分的态可填充在夸克模型的多重态中，还有很多粒子未发现。

它们的质量区域正好与胶子球重叠在一起，实验上测量到的态很可能是它们的混合态。此外，还会有夸克、反夸克和胶子构成的束缚态。一对夸克和一对反夸克构成的四夸克态等也在这一能量区域，混合在一起难以分开，使得研究胶子球更为困难。需要更多的 $J/\psi$ 事例数才能获得更精确的测量结果。

### 2. $\xi$ 粒子的性质的研究

1983年Mark III发现了 $\xi$ 粒子，而法国的DM2组却没有观察到它。为了确认它的存在以及测量 $\xi$ 粒子的性质，需要更多的事例数。例如，为了确定它的自旋、宇称、大约需要积累一千万以上 $J/\psi$ 事例数。

### 3. D介子的衰变道和衰变机制的研究

由于一个粲夸克和一个轻夸克组成的D介子质量为1870MeV，因此只有 $\psi'$ 可以衰变为一对D介子。D介子主要是通过弱相互作用衰变为终态产物，其中粲夸克c衰变为奇异夸克s或下夸克d，而另一个轻夸克u或d则作为旁观者不变(图3)。

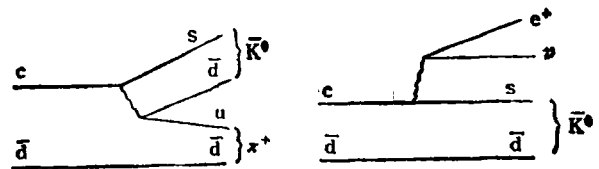


图3  $D^+$ 介子衰变为 $\bar{K}^0\pi^+$ 或 $D^+$ 介子衰变为 $\bar{K}^{*0}\pi^+$ 图  
 $D^+$ 的组成是 $(c\bar{d})$ ，即是由粲夸克c和反d夸克组成；  
W表示媒介弱作用的中间玻色子

实验上告诉我们，粲夸克c衰变为奇异夸克s要比衰变为下夸克d的几率大得多，通常采用Cabbibo角度 $\theta$ 来表示。按直观的旁观者模型可以给出衰变宽度 $\Gamma$ ，

$$\begin{aligned} \Gamma(c \rightarrow s\bar{d}) &\propto 3 \cos^4 \theta, \\ \Gamma(c \rightarrow d\bar{u}) &\propto 3 \cos^2 \theta \sin^2 \theta, \\ \Gamma(c \rightarrow s\bar{s}) &\propto 3 \cos^2 \theta \sin^2 \theta, \\ \Gamma(c \rightarrow d\bar{u}) &\propto 3 \sin^4 \theta, \\ \Gamma(c \rightarrow s l^+ \nu_l) &\propto \cos^2 \theta, \\ \Gamma(c \rightarrow d l^+ \nu_l) &\propto \sin^2 \theta, \end{aligned}$$

其中后两种衰变产物中包含轻子，称为轻子型衰变；前四种不包含轻子，称为非轻子衰变。粗略地说，在D介子的衰变终态中有60%是非轻

子衰变过程, 40% 是轻子型衰变过程。由于 Cabbibo  $\theta$  大约为

$$\left(\frac{\sin \theta}{\cos \theta}\right)^2 \cong \frac{1}{20},$$

因此  $c \rightarrow s$  是 Cabbibo 有利过程, 而  $c \rightarrow d$  是 Cabbibo 压低过程。例如, 上述第一种是 Cabbibo 有利过程, 第二、三种是 Cabbibo 一级压低过程, 而第四种则是 Cabbibo 二级压低过程, 第五种是 Cabbibo 有利过程, 第六种是 Cabbibo 压低过程。粗略地讲, Cabbibo 一级压低过程是有利过程的  $\frac{1}{20}$ 。Cabbibo 二级压低过程的几率就更小了, 仅是有利过程的  $1/400$ 。如果探测器测量到四万个 D 事例, 那么 Cabbibo 二级压低过程总共只有 100 个事例, 其中非轻子衰变事例总共只有 60 个。由于非轻子衰变还有很多道, 实验上测到每道的衰变事例就少到几乎测量不到, 也就更难说测量的准确度了。目前美国 Mark III 探测器已收集到 37400 个  $D\bar{D}$  事例。对 Cabbibo 有利的衰变过程的测量已比较完善, 问题是收集更多的事例, 以提高精确度。对于 Cabbibo 一级压低的过程, 在每个衰变道里只收集到几个到十几个事例, 仅给出一些粗糙的值。对于二级 Cabbibo 压低过程, 在目前 Mark III 上还未观测到。在 D 介子衰变中, D 介子寿命的测量一直是个谜。按照直观的夸克模型,  $D^+$  介子的寿命应等于  $D^0$  介子的寿命, 然而实验测量结果表明前者是后者的 2.3 倍。这样就提出一个问题, 在 D 介子衰变过程中是什么样的机制使得  $D^0$  介子的衰变宽度增加而使  $D^+$  的衰变宽度减少。实验上精确的测量将对确定目前已提出的几种机制会提供较好的判据。此外, 对于 D 介子的产生截面和衰变道的进一步测量以及  $D^0$ - $\bar{D}^0$  混合和 CP 破坏的测量都是需要研究的课题。

1986 年, Mark III 已在  $J/\psi$  能区和  $\psi'$  能区物理工作成功的基础上进一步提高能量在 4.14 GeV 能区进行工作, 目的在于探测 F 介子和  $F^*$  介子的性质和衰变道。现在已获得了初

步的结果。

#### 四、北京正、负电子对撞机的物理目的

北京谱仪开始工作时, 在美国斯坦福的同类谱仪 Mark III 已工作七年了。这一方面说明, 我们在高能物理实验基地空白的基础上已向国际水平前进了一大步, 但是从另一方面说, 在 Mark III 工作七年以后, 北京谱仪的工作要想取得重要的进展是不容易的。前面已经简单地介绍了目前在粲粒子物理中的研究状况, 它告诉我们 Mark III 谱仪所遗留下的物理问题难度很大, 这就要求北京正、负电子对撞机工程无论是加速器还是北京谱仪都具有很好的性能。

首先, 希望收集到更多的事例数, 在高统计下获得更精确更多的物理结果。这就要求对撞机工程的亮度高、能散度小、运行稳定。标志对撞机工程性能的一个重要指标是亮度  $L$ , 正、负电子对撞后产生的粒子数将正比于亮度  $L$ 。事例数 =  $L\sigma T$ , 其中  $\sigma$  是产生截面,  $T$  是时间。亮度是每秒钟每平方厘米反应截面内产生的粒子对撞事例数。因此, 亮度越高说明粒子相碰的次数越多, 加速器的性能越好。对撞机的亮度与能量有关, 在对撞机的工作能区内与设计粒子能量相应有一个最大的亮度值, 超出于设计能量, 亮度很快下降。只能在一个较窄的能区内工作, 这是对撞机的一般特点。北京正、负电子对撞机的设计亮度峰值在每束粒子能量为 2.8 GeV 处, 这时其亮度峰值为  $1.7 \times 10^{31} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。当工作能量在 3.1 GeV 时, 亮度为  $5 \times 10^{30} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ , 这一亮度值比目前国际上在这一能区工作的 Spear 亮度还高十倍。这意味着在  $J/\psi$  能区, 一年收集到的事例数是 Spear 十年内才能收集到的数据。这一优点就使得北京正、负电子对撞机运行后可能做出国际水平的物理工作。

第二, 要求北京谱仪的探测效率和分辨本领高。高能加速器只能提供粒子束流。正、负电子束流在储存环中进一步加速实现对撞, 相

相互作用产生一系列的次级粒子,将它们种类、方向、动量、能量记录下来并进行分析,得出结论,这就是探测器的任务。北京正、负电子对撞机上的北京谱仪就是这种探测器。它是由中心漂移室、主漂移室、飞行时间计数器、簇射计数器、 $\mu$ 子计数器等部分组成的探测系统。它的直径和长度各约6m和4m,重约400t。北京谱仪置于对撞点,中心漂移室起触发作用,它的外面是主漂移室用以测量荷电粒子的径迹及其动量与能量损失,以分辨电子、 $\pi$ 介子、K介子和质子。再外面一层是飞行时间计数器,用以测量粒子飞行所经历的时间,从而区分各种荷电粒子如 $e^\pm$ ,  $\pi^\pm$ , K, p和排除宇宙线本底。簇射计数器在飞行时间计数器外面,用以测量光子的能量和方向以及辨认电子。再外面一层是用以产生4000G磁场的线圈,它的外面包有磁铁。最外面是 $\mu$ 子探测器。两端的端盖装有飞行时间计数器和簇射计数器。整个探测器有很大的探测立体角;对于荷电粒子有良好的辨认本领、良好的空间和动量分辨率;对于低能光子也有良好的空间和能量分辨率。

第三,要抓住数据处理这一重要环节。如果将探测器比作人的眼睛,那么数据处理就好比人的大脑。北京谱仪记录的事例约每秒钟一个事例。设想对撞机每年进行正、负电子对撞运行时间为六千小时,则每年累积有待处理的事例约为二千万个。这就需要大型计算机根据实验要求编制的程序进行分析处理,才能得到最后的实验结果。用于数据处理的计算机又分为在线和离线计算机两类。在线计算机控制和监测探测器的工作状态、记录、分析和初步处理。离线计算机则要把磁带记录下的几千万以至于上亿个数据进行处理,最后以图表方式给出物理实验结果。因此,对撞机的总体中心须包括有装置大型计算机的计算中心。

有了上述三个必要的条件,我们就可能解决目前国际上在这一能区留下的大量未解决的物理问题。这些物理问题是:

(1) 高统计 $J/\psi$ 的辐射衰变测量和新粒子态的研究[胶子球、 $\xi(2,2)$ 粒子、四夸克态、希格

斯粒子、……]以及 $J/\psi$ 强子衰变道的精确测量。

(2) 高统计D介子的各种衰变道的测量,特别是Cabbibo一级和二级压低衰变过程的测量(包括CP不变性破坏参量的测量)。

(3) F介子和 $\tau$ 轻子的各种衰变道的测量。

(4) 粲重子(如 $\Lambda_c$ )性质和衰变分枝比的测量。

(5) 粲粒子谱和束缚态的分析。到目前为止,在粲粒子家族中 $^1P_1(J^{PC} = 1^{+-})$ 态仍未发现。

(6)  $\psi'$ 的辐射衰变和强衰变的研究,例如 $\psi' \rightarrow \pi^0 P_1$ ,  $^1P_1 \rightarrow \gamma \eta_c$ ;  $\eta_c$ 的自旋宇称。

(7) 其他。如R值的测量,各种辐射衰变过程对量子色动力学的检验等。

从目前正、负电子对撞机的工程进度来看,预期1988年9月北京谱仪可以进入对撞点安装,继而进行调试和开展物理实验研究。计划从1988年9月到1988年底对北京谱仪进行安装和调试。从1989年1月到1989年6月,北京谱仪进行初步的总体验验和投入运行。从1989年7月到1990年底实现北京谱仪最终检验并在 $J/\psi$ 能区正式运行,希望在这段时间内积累两千万事例进行 $J/\psi$ 物理研究。从1991年初到1992年底,以两年时间对D介子的各种衰变道进行测量,希望在 $\psi''$ 能区达到 $40\text{Pb}^{-1}$ 的积分亮度。如果上述物理实验测量进展得顺利,则可望从1993年转入对F介子、 $\Lambda_c$ 粲重子等物理进行实验研究。

此外,为高能物理研究而建造的北京正、负电子对撞机还提供了一种非常重要的副产品——同步辐射。同步辐射已广泛应用于科学技术的研究,例如应用于原子和分子物理、凝聚态物理、化学、生命科学、材料科学、制造大规模集成电路的X光刻技术、显微技术等。正如前面所述,正、负电子在储存环中运行加速实现对撞,电子在储存环中经受磁场的力而沿着和轨道以及磁场相垂直的方向加速,从而放出电磁波,辐射出的电磁波的能量与电子能量E的四

次方成正比。由于这种辐射首先是在电子同步加速器运行过程中观察到的,所以叫做同步辐射。

同步辐射和通常的 X 光源和真空紫外光源相比有很大的优越性。它具有高度的准真性,有非常宽的可用的频带、非常大的光子通量以及很高的极化度等。由于同步辐射具有这些优点,所以它为一系列科学技术的研究工作带来了革新,吸引了一系列科学的研究人员利用同步辐射进行研究。

近几年来,在国际上已经建成了好几台专为产生同步辐射而不是为高能物理研究用的电子储存环。美国、西德、意大利、法国、英国、苏联都已经建成运行电子储存环同步辐射装置。我国在合肥即将建成专为同步辐射应用的实验室,而北京正、负电子对撞机建成后除了用于进行高能物理研究外,也将作为同步辐射装置用于科学技术的研究和发展。

### 五、北京正、负电子对撞机在国际高能物理学发展中的地位

自 1932 年世界上建成第一台加速器以来,平均每隔七年加速器的能量就提高十倍。现在加速器的能量已比第一台加速器能量增加了一百多万倍。可以说世界上加速器发展的总趋向

是提高能量、提高亮度。在当前高能加速器的发展中,对撞机是主要形式。七十年代,建成了一系列正、负电子对撞机。八十年代以来,特别是西欧中心 Van der Meer 提出的随机冷却方法在建造正、反质子对撞机中起了关键性的作用,使得正、反质子对撞成功。发现  $W^\pm, Z$  中间玻色子的 SPPS 就是质子-反质子对撞机,每一个束流的能量最高达到 450GeV。最近日本建成的 Tristan 就是正、负电子对撞机,每个束流能量为 30GeV。正在西欧建造的 LEP 也是正、负电子对撞机,每个束流为 50GeV。北京正、负电子对撞机在国际上并不处于领先地位,在能量上相当于七十年代初建成的美国的同类型的装置。但是,根据我们的设计亮度要比同类型装置高,这意味着我们的装置可以获取更多的事例数。由于在这一能区内还有很多物理问题有待解决,可以利用北京正、负电子对撞机装置作为进行高能物理研究的一个重要窗口,有可能在粒子物理领域做出具有国际水平的工作。因此,选中北京正、负电子对撞机作为我国第一个高能物理实验基地,既符合国情又接近于国际高能物理研究的前沿,不仅可以为我国高能物理在人才上、科学技术上打下很好的基础,而且可做出一批具有国际影响的学术上有意义的研究成果。

(上接第 501 页)

- [1] Y. Rytz-Froidevaux, *Appl. Phys. A*, **37**(1985), 121.
- [2] M. S. Hess et al., *J. Appl. Phys.*, **43**(1972), 4680.
- [3] D. B. Geohegan et al., *Appl. Phys. Lett.*, **45**(1984), 1146.
- [4] R. Solanki et al., *Appl. Phys. Lett.*, **38**(1981), 572.
- [5] J. Y. Tsao et al., *Appl. Phys. Lett.*, **42**(1983), 559.
- [6] P.K. Boyer et al., *Appl. Phys. Lett.*, **39**(1982), 300.
- [7] Y. Numasawa et al., *J. Electronic Materials*, **15**(1986), 27.
- [8] R. Solanki et al., *Appl. Phys. Lett.*, **43**(1983), 454.
- [9] Nobuki Mutsukura et al., *J. Appl. Phys.* **60**(1986), 3364.
- [10] T. Saitoh et al., *Appl. Phys. Lett.*, **42**(1983), 678.
- [11] P. Sihanugrist et al., *Jpn J. Appl. Phys.*, **25**(1986), 440.
- [12] Shoji Nishida et al., *J. Appl. Phys.*, **58**(1985), 1427.
- [13] S. Nishida et al., *Jpn J. Appl. Phys.*, **25**(1986), 17.
- [14] Shoji Nishida et al., *Appl. Phys. Lett.*, **49**(1986), 79.
- [15] M. Konagai et al., *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, **71**(1986), 119.
- [16] Shinya Tsuda et al., *Jpn J. Appl. Phys.* **26**(1987), 28.