

超小型同步辐射光源的进展

Progress in Supersmall Synchrotron Light Source

刘乃泉 王 垞 刘国治 车 平

(中国科技大学 合肥 230026)

提要 本文概述当前世界上各种超小型同步辐射光源的发展现状,呼吁国内积极组织力量,并在90年代后期建造我国的超小型同步辐射光源,建立我国的亚微米集成电路生产基地。

由于20世纪80年代同步辐射光源的迅速发展,利用同步辐射光中的软X射线进行光刻的工作引起科学家和产业界的极大兴趣。经过近十年的努力,人们克服了种种技术上的困难,用同步辐射光进行亚微米光刻已经取得了重大进展。1988年5月IBM公司宣布他们在贝尔国家实验室中已成功地用同步辐射光刻技术制造出0.5微米的芯片,日、德、英、瑞典和中国也都在致力于亚微米光刻技术的研究。随着芯片的亚微米化,计算机将进一步微型化,并更广泛地走入人们的生活。

目前几乎所有已建成的同步辐射光源都设有专门用于亚微米光刻研究的光束线,但是如果大量生产亚微米集成电路芯片,则需要建造专用的同步辐射光源。对这种光源的要求是,设备结构紧凑,占地面积小;软X射线的功率较强;造价较低,便于推广。本文扼要介绍国外这种小型同步辐射光源的发展现状,以及我国开展这方面研究的概况。

一、国外小型同步辐射光源发展现状

第一个小型同步辐射光源是由德国慕尼黑工业大学物理系教授特林克斯(Trinks)设计的,主要包括一个弱聚焦的圆形超导磁铁的储存环($r_0 = 0.287$ 米, $B_0 = 5$ 特)和一台8兆电子伏的电子直线加速器。8兆电子伏电子注入到储存环后再升能至430兆电子伏,这个小环名为“Klein ERNA”,其主要设计参数列于表1。“Klein ERNA”的注入系统是一个8兆电子伏的直线加速器,能产生高流强(2安)短脉冲(10纳秒)。其能散度小于1.5%,发射度小于 3π 毫米·毫弧度,注入轨道半径位于磁场轨道之外4厘米,电子注入后,在下游120°处有一个快降落的磁场脉冲,使电子轨道发生变化,造成电子束振荡

幅度减小10毫米以上,因而进入磁场轨道。

表1 “Klein ERNA”小环物理参数

电子注入能量	E_i	8兆电子伏
电子储存能量	E_s	430兆电子伏
电子轨道半径	r_0	0.2865米
旋转周期	T_0	6纳秒
同步辐射临界波长	λ_c	2纳米
磁场对数梯度	n	0.525
水平自由振荡频率	Q_x	0.6892
垂直自由振荡频率	Q_y	0.7246
磁铁重量		30吨
高频工作频率		166.6兆赫
高频峰值电压		64.2千伏
高频消耗功率		13千瓦

后来,威尔逊(Wilson)和范斯廷伯杰(Van Steenberger)等人提出了用两块、三块或四块二极磁铁组成的超导储存环取代上述的单块二极磁铁储存环,目的是便于在二极磁铁之间的直线段上安装高频腔、聚焦元件以及色品校正元件等。

但是第一个真正付诸工程实践的是柏林的BESSY和Fraunhofer研究所,他们于1982年完成了一个由两块180°超导磁铁和直线段组成的储存环设计。电子由一台50兆电子伏的跑道式回旋加速器注入到这个储存环中,然后升能到592兆电子伏。这样在4.47特的超导磁场中可以产生临界波长为1.1纳米的同步辐射光。这个由两块磁铁所组成的超导环被命名为“COSY”,其主要参数如表2。

COSY建成后,首先使超导磁铁工作在常温状态,主要研究注入问题。这时,50兆电子伏的电子注入到储存环后,只能升能至90兆电子伏。1986年成功地实现了低能注入,在常温磁场下,储存环中的电

表 2 COSY 小环主要物理参数

电子注入能量	50 兆电子伏(跑道式电子回旋加速器)
注入流强	20 毫安
电子最终能量	592 兆电子伏
储存环中电流	100 毫安
超导磁场	4.47 特
电子轨道半径	0.44 米
电子旋转周期	32 纳秒
电子轨道周长	9.6 米
同步辐射波长	1.1 纳米
磁场对数梯度	0
水平自由振荡频率	1.20
垂直自由振荡频率	1.28
磁铁重量	5 吨

流达到数十毫安,但是1987年开始转入低温超导磁铁工作状态后,有相当长的一个时期50兆电子伏低能电子不能在环中积累,经过二年的努力,1989年终于获得成功,产生了同步辐射光。尽管目前COSY性能还未能达到设计要求,但这毕竟是世界上第一个出光的超导小型专用同步辐射光源。

日本电工技术实验室(ETL)与住友电气工业公司合作研究的常温磁铁小环,是由八块偏转磁铁和四长四短的直线段所组成。直线段上装有八块水平聚焦四极铁和四块垂直聚焦四极铁,偏转磁铁的磁场对数梯度设计值为0.5,同时在偏转磁铁的出入口均有12°的倾斜角,以增加对电子束的垂直聚焦。该装置命名为“NIJI—1”,其主要参数如表3:

表 3 NIJI—1 小环物理参数

注入电子能量	160 兆电子伏(直线加速器)
电子最终能量	230~600 兆电子伏
偏转磁场	0.76 特
电子轨道半径	0.7 米
电子轨道周长	13.256 米
磁场对数梯度	0.5
水平自由振荡频率	1.2~1.8
垂直自由振荡频率	1.2~1.8
高频频率	158.4 兆赫
高频电压	24 千伏
最大高频功率	2 千瓦
存储电流	300~500 毫安

NIJI—1 于1986年2月首次获得储存束流,1987年3月能量为160兆电子伏的电子束流强度达到340毫安,其中主要解决了以下四个问题:

1. 在束流传输线上增加了一个校正磁铁,使束流出口位置与角度得到精细调节。
2. 借助束流位置监测器,通过调节偏转磁铁上的微调线圈校正束流闭轨。
3. 调整了切割磁铁和Kicker磁铁的位置后,注入效率明显增加。

4. 将束流位置监测器用作离子清洗电极。

160兆电子伏,344毫安的储存电流寿命达到50分钟,这时环中真空度为 5×10^{-9} 托。当磁场以0.046特/秒速度上升时,电子能量增到230兆电子伏,束流无损失。

在NIJI—1环中也观察到离子捕获引起束流截面增大效应。当束流达到120毫安后,不加清洗电压时,束流强度就不再增加,当—400伏电压加在清洗电极上后,最大储存电流达到344毫安。

受到Aladdin快速注入思想的启发,1988年以后在NIJI—1环上也进行了低能快速注入的实验,取得了令人振奋的结果。实验是在注入能量为90兆电子伏下进行的。这时水平阻尼时间为0.6秒,通常应该每秒注入1.6次,实验将注入频率提高到每秒15次。结果发现,电子积累在每秒5次以前线性增长,然后增长速度变缓慢,但在每秒15次时,束流积累速度仍为每秒2.5次的3倍。因此,在低能注入过程中肯定还存在着除辐射阻尼以外的阻止束流在切割磁铁上丢失的机制。

跟踪计算表明,进入储存环后,电子所处的相空间(x,x')不同,造成束流丢失的几率也不大一样,Kicker的作用使某一部分束流振幅值增长,而另一部分束流振荡减弱。为了避免束流注入后与切割板相碰,Kicker的作用力大小要使电子轨道尽可能靠近切割板。当然注入速度不同时,Kicker对束流轨道的最佳偏转角也不相同。因此在调机时,增加注入频率,相应也要调整Kicker电流。束流积累速度是由注入效率和注入速度的乘积所决定的。

美国同步辐射光源实验室(NSLS)于1985年开始设计并研制由两块180°超导磁铁组成的小型同步辐射光源。其主要参数如表4。

表 4 NSLS 小环物理参数

电子最终能量	728 兆电子伏
储存环电子轨道周长	10.2 米
超导磁铁场强	3.5 特
电子轨道半径	0.694 米
水平自由振荡频率	1.56
垂直自由振荡频率	1.60
同步辐射临界波长	1.0 纳米
光源总价	~1000 万美元

前苏联新西伯利亚核物理研究所于1989年发表了一个超导小环的设计。其主要参数如表5。

日本“AURORA”超导环是由日本住友重工研制成功的。这是世界上第一个宣布商品化的小型同步辐射光源。1987年在日本的一次加速器会议上,对这个装置做了详细介绍,1988年在罗马召开的欧洲第一次加速器会议上,该公司宣布了这个装置可以接受订货。这个光源主体是由一个圆柱形单体磁铁,包括超导线圈,磁极和磁轭所组成。磁铁分上下

表 5 前苏联新西伯利亚小环物理参数

注入电子能量	60 兆电子伏(电子直线加速器)
最终电子能量	600 兆电子伏
储存环电子流强	300 毫安
电子轨道半径	0.33 米
旋转周期	33 纳秒
超导磁场	6 特
电子轨道周长	10 米
二极磁铁数目	8
四极磁铁数目	12
六极磁铁数目	2
水平自由振荡频率	2.6
垂直自由振荡频率	1.12
高频工作频率	30 兆电子伏
高频加速电压	100 千伏
高频功率	40 千瓦
同步辐射临界波长	0.86 纳米

两层,便于安装。超导线圈也分为两部分,上下各 1 948 匝,线圈内径为 1.48 米,外径为 1.80 米,每个线圈高 0.162 米。上下两个线圈中心间距为 0.62 米。线圈浸在液氮中冷却。磁极由低碳优质锻钢做成,内径为 0.70 米,外径 1.30 米,高 0.58 米,上下两块磁极中心位置的间隙为 0.28 米。磁极表面坡度保证磁场对数梯度 n 值可由 0.73 变化到 0.25。极面上还装有 6 个微调线圈。磁轭也是圆柱形,但分成许多小的厚块,以便于运输和安装,每块重不超过 5 吨。注入是采用一个 150 兆电子伏跑道式电子回旋加速器,加速腔是采用商品的 6 兆电子伏电子直线加速器。电源为一个 5 兆瓦速调管。

这台装置的电子注入方法与惯用的方法不同,采用 1/2 共振法,注入系统包括一个静电偏转板,磁通道和一个扰动元件,扰动元件产生一个八极脉冲

表 6 AURORA 物理参数

电子注入能量	150 兆电子伏(电子回旋加速器)
电子注入流强	5 毫安
电子注入速度	<180 赫
电子最终能量	650 兆电子伏
储存环中电流	300 毫安
磁场强度	4.34 特
轨道半径	0.5 米
磁场对数梯度	0.73~0.25
高频工作频率	190.86 兆赫
高频工作电压	120 千伏
同步辐射临界波长	1.02 纳米

磁场,其衰减时间为 1 微秒,这个扰动元件是一个空心磁铁,轴对称结构,包括四个内导体和四个外导体。磁通道装在场的边缘区,使注入电子束聚焦并将其引入扰动元件。磁通道也是由轴对称的空心线圈做成,在线圈外部无磁通。这个线圈要求有强的磁场和小的尺寸,因此导线中电流密度要大,要有水冷。AURORA 主要物理参数如表 6。

1990 年住友重工公司又宣布 AURORA 已经注入成功,并且升到设计值。这样证明了他们所采用的 1/2 共振注入方法是成功的。

二、国内研究小环现状

清华大学加速器实验室于 80 年代中期着手研究小型电子储存环,并完成了一个常温磁铁的紧结构同步辐射光源设计,发表在 1985 年的美国贝尔国家实验室国际会议上。这个方案的主要特点是采用特别低的注入能量,即用 15~20 兆电子伏强流电子回旋加速器做为注入器,通过一次多圈强流注入,可望在储存环中获得 100 毫安以上的电流。与此同时,该实验室又对低能注入问题进行了深入的探讨,如研究了注入束流的能散度和发射度对俘获效率的影响,修正了现行的束流寿命公式,得出了低能注入时,最佳升能和最佳高频升压曲线。这些理论计算部分结果分别在美国和日本的加速器上得到了实际验证。近年来,清华大学又研究了用超导磁铁代替常温磁铁低能注入的储存环方案。其主要物理参数如表 7。

表 7 清华大学低能注入超导环

注入电子能量	20 兆电子伏(电子回旋加速器)
注入流强	100 毫安
电子最终能量	600 兆电子伏
储存环电流	>100 毫安
储存环轨道周长	11.6 米
电子轨道半径	0.445 米
超导磁场	4.5 特
磁场对数梯度	0.5
水平自由振荡频率	1.28
垂直自由振荡频率	1.28
高频工作频率	129.29 兆赫
高频工作电压	65 千伏
同步辐射临界波长	1.15 纳米

(责任编辑 刘先曙)