

## 物理学与新型功能材料专题系列介绍 (VII)

### 高温半导体材料与器件

章熙康 陈国明

(中国科学院上海冶金研究所信息功能材料实验室, 上海 200050)

通信领域要求更高的频率和更大的功率, 从飞机发动机直到宇宙飞船都要求器件在恶劣的条件下工作。这些需求激励着高温半导体的研究, 因为它们具有制作抗辐照的大功率、高温、高频及光电子器件的潜力。过去十年内在这一领域取得了很大的进展。本文评述了在半导体金刚石、碳化硅和氮化物的研究方面的进展与存在的问题。

#### Abstract

The communications field is constantly demanding higher frequencies and higher power levels. Applications ranging from aeroplane engines to spacecraft require device operation in harsh environments. These demands have stimulated investigations in high-temperature semiconductors which have potential for use in high-power, high-temperature, high-frequency and optical microelectronics devices resistant to radiation damage. The progress and problems in the research and development of semiconducting diamond, silicon carbide and nitrides are reviewed.

半导体器件的发展是本世纪最伟大的科技进步之一, 它深刻地改变了生产和生活的面貌。从导弹、卫星到生产过程的自动控制, 从经营管理、大容量计算到各种家用电器, 都离不开半导体器件, 而半导体材料是一切半导体器件的基础。如今, 硅是唱主角的半导体材料, 随着微波器件及光电子器件的发展, III-V 族半导体如 GaAs, InP 等的研究和应用也有了长足的发展。但电子学对器件提出了愈来愈高的要求, 特别是需求大功率、高频、高速、高温以及在恶劣环境中工作的器件。例如, 高性能军用飞机及超音速飞机发动机的监控系统要求在 300°C 长期工作, 而目前一般的器件只能在 100°C 正常运行。在星际航行方面, 水星在接近太阳时的表面温度为 370°C, 而金星表面温度更高达 450°C, 压力为  $10^7$  Pa。可是硅电池的最高工作温度仅 200°C, GaAs 电池虽可在 200°C 以上

工作, 但效率大大下降。通信领域也要求更高的频率和更大的功率。所有这些都是现有的 Si 器件或 GaAs 器件所无法满足的。在宇宙飞船上, 为使器件温度降至 Si 器件所能容忍的 125°C, 就必须配备冷却系统, 如果器件能在 325°C 工作, 除掉这一冷却系统就可使无人飞船的体积减少 60%。时代的需求呼唤着高温半导体材料的出场, 因为它能满足上述某些极为苛刻的要求。对于研究半导体材料的人来说, 当今正面临着一个令人振奋的时代, 因为近年来在高温半导体方面的研究进展很快。

对于高温半导体, 目前并没有确切的定义, 它是相对于 Si、GaAs 等一般的半导体而言的, 通常又称为宽禁带半导体, 因为只有宽禁带材料才能在相当的高温保持其半导体特性。宽禁带半导体种类很多, 目前最引人注意的是金刚石、SiC 和 III 族元素氮化物。本文对这三

类材料及器件的研制情况作简要的评价,有兴趣的读者可参阅文末所附的评述性文献<sup>[1-3]</sup>。

## 一、金 刚 石<sup>[3]</sup>

金刚石又称钻石,早在 3000 多年前人类就发现了钻石,并流传着许多关于钻石的神话,相信它具有威力与神性,能治百病,可避邪消灾。古希腊哲学家柏拉图甚至认为钻石有生命,是天体发酵成为精灵而降于人世。1776 年英人 Tennant 通过钻石的燃烧实验证明它是碳。19 世纪末叶在南非发现钻石管状脉,管状脉中的火山管道垂直深入地地下达 100 公里,于是人们相信钻石是在高温高压下形成的。为了模拟这一自然条件而获得钻石,甚至进行过一些极为危险的试验。直到本世纪热力学渐趋成熟,人们计算得金刚石是碳在高温高压下的稳定相。理论指导着实践,1955 年美国 GE 公司用高温高压法合成了金刚石。

金刚石和石墨一样,由碳原子组成,其晶体结构和 Si 相似,由两个面心立方晶胞套构而成。大多数天然金刚石为绝缘体,1952 年 Custers 发现了含 B 的 IIb 型半导体金刚石,1962 年合成了掺 B 的 P 型金刚石。

与半导体器件有关的金刚石特性列于表 1,

作为比较,同时列出了 Si 和 GaAs 这两种半导体材料的特性。

从表 1 我们对金刚石可以获得这样几个印象:(1)禁带宽,可作为高温半导体材料;(2)迁移率高,适合于高速电子器件;(3)介电常数小,这正是微波器件所追求的;(4)导热系数极高,意味着可提高器件的集成度;(5)从红外到紫外波段的光透过率,说明具有制备光电子器件的潜力。表中还列出了两项综合指标,Johnson 指数是衡量大功率高频器件应用的指标;Keyes 指数是衡量高频、高集成度器件及高速开关性能的指标,二者都比 Si 或 GaAs 高出数十倍之多。可见金刚石在高温、微波、大功率及高速电子器件的应用方面具有极大的潜在优势。

用单晶金刚石颗粒制作器件的研究工作开展得很早,研制过的器件主要有:(1)整流二极管:在 P 型金刚石上注入 Li<sup>+</sup>,形成 p-n 结,具有整流的效果,由于金刚石的体电阻很高,从而在二极管上的直流压降达 6—10V。用 Au, Al 等多种金属制成的 Schottky 二极管在 500°C 仍具有整流特性。

(2)光探测器:金刚石在 0.2—1.2 μm 波长范围内的光电导很强,特别是在 0.2—0.4 μm 波段一般材料的光电导很小,金刚石的暗电阻高,故暗电流可以忽略,加以它其他综合性能,

表 1 金刚石的特性

性 质	Si	GaAs	天然金刚石
带隙 (eV)	1.10	1.43	5.45
电阻率 (Ω·cm)	1×10 <sup>9</sup>	1×10 <sup>3</sup>	1×10 <sup>16</sup>
空穴迁移率 (cm <sup>2</sup> /v·s)	600	400	1600
电子迁移率 (cm <sup>2</sup> /v·s)	1500	8500	1900
击穿电场 (v/cm)	3×10 <sup>6</sup>	3.5×10 <sup>6</sup>	1×10 <sup>7</sup>
载流子寿命 (s)	2.5×10 <sup>-9</sup>	10 <sup>-7</sup>	1×10 <sup>-10</sup>
电子速度 (max)(cm/s)	1×10 <sup>7</sup>	2.5×10 <sup>7</sup>	2.7×10 <sup>7</sup>
功函数 (eV)	4.8	4.7	4.8
介电常数	11.0	12.5	5.5
硬度 (kg/mm <sup>2</sup> )	1000	600	10000
导热系数 (25°C) (W/cm·K)	1.45	0.46	20
晶格常数 (Å)	5.43	5.65	3.57
折射率	3.5	3.4	2.41
膨胀系数 (K <sup>-1</sup> )	2.6×10 <sup>-6</sup>	5.9×10 <sup>-6</sup>	0.8×10 <sup>-6</sup>
Johnson 指数	5.0×10 <sup>11</sup>	1.3×10 <sup>12</sup>	1.4×10 <sup>13</sup>
Keyes 指数	1.4×10 <sup>3</sup>	6.3×10 <sup>2</sup>	4.3×10 <sup>4</sup>

用以制作光探测器极为有利,目前已制成紫外波段光电子开关。

(3) 发光管: 在天然金刚石的一面注 B, 另一面注 Li, 形成 p-i-n 结构, 制成了发光管, 发光峰在 450nm, 输出的量子效率达 4%。

(4) 晶体管: 1982 年在天然金刚石上制成了双极型晶体管, 其发射极与集电极作在同一面上, 基区宽度大, 电流增益仅为 0.1。该三极管在 500°C 以下不能达到载流子浓度的饱和区, 这是一个不利因素。

(5) 核辐射探测器: 金刚石核辐射探测器的优点是对于 847 keV 电子束的能量分辨率可达 2.7keV, 比硅探测器高得多, 而且在低辐射剂量时保持稳定, 与工作电压及温度无关。

(6) 热敏传感器: 工作温度为 2—1000K, 优点是灵敏度高, 稳定性好, 响应快。已制成的温度计的热惯性小于 1 秒, 温标重现性优于 0.2%。

天然金刚石量少价高, 合成金刚石的尺寸为毫米级, 用它们制作器件是不经济不现实的。尽管金刚石在常压下是亚稳相, 但它与稳定相石墨的自由能之差并不大(0.692kcal/mol), 故在低压下合成金刚石并非不可能。1958 年 Eversole 已取得低压合成金刚石的专利, 但生长速率极低。苏联学者 Derjaguin 等发现了原子氢在合成中的作用, 这是一项突破。日本学者在此基础上发展了多种低压合成金刚石膜的方法, 包括各种 CVD 方法, 等离子喷镀法及燃烧火焰法等。目前最高生长速率接近于 1mm/h, 最大生长面积达  $\phi$  200mm。

制膜技术的发展促进了金刚石器件的研制。用多晶或同质外延的金刚石膜, 以 Au 作 Schottky 接触制成的整流二极管可在 580°C 工作。这种 Schottky 二极管的整流特性与金刚石体晶 Schottky 二极管相似, 都是由深受主中心所控制。利用 Schottky 栅还制作过 MESFET。用掺 B 的同质外延金刚石膜制作的绝缘栅 FET 可在 300°C 工作。用金刚石膜也制成了蓝光发光管。用金刚石膜制作的热敏传感器的灵敏度比目前通用的 Pt 电阻高, 使用

温度也高一些。尽管金刚石薄膜器件的研究还是近二、三年才开始, 但上述简单的实验型器件已初步展示了它的潜力, 当然, 真正的金刚石电子学工艺还是处于起步阶段。

## 二、SiC<sup>[2,3]</sup>

SiC 在自然界几乎不存在。1824 年 Berzelius 在试图合成金刚石时偶然发现了 SiC, 具有讽刺意味的是, 在高温半导体的行列中, Berzelius 当时未能获得的金刚石如今却成了 SiC 有力的竞争者。SiC 在相近的化学计量成分时具有近 200 种各不相同的晶体结构, 常见的有六方结构( $\alpha$ -SiC)和立方结构( $\beta$ -SiC)两大类。在  $\alpha$ -SiC 中, 6H-SiC 是最稳定的结构, 在  $\beta$ -SiC 中主要有 3C-SiC, 其中 6 和 3 表示在一个周期结构中平行平面的数目。3C-SiC 和 6H-SiC 的半导体特性列于表 2。

从表 2 可以看出, 作为微波及毫米波器件以及大功率器件, SiC 的全面性能略逊于金刚石, 但比 Si 及 GaAs 要好。其中 3C-SiC 特别适合于高温、大功率和高频器件, 而 6H-SiC 有利于制作蓝光发光管, 因为它的掺杂工艺比较成熟。因此, 在金刚石膜的低压淀积技术问世之前, SiC 是高温半导体的热点, 经过几十年的努力, 它的工艺也比较成熟。1955 年 Lely 用升华法生长了  $\alpha$ -SiC 单晶, 目前  $\alpha$ -SiC 单晶的尺寸已达到直径大于 30mm, 长度超过 40mm。在单晶外延膜制备方面, 直径为 50—70mm 的单晶 3C-SiC 膜已在硅衬底上外延成功, 衬底温度也由 1300°C 降至 900°C, 室温电子迁移率达 750cm<sup>2</sup>/V·s。但由于 3C-SiC 与 Si 衬底的晶格常数及膨胀系数失配较大, 因而膜中缺陷较多, 主要是在{111}面上出现微孪晶及层错。新近已成功地生长了优质的 6H-SiC 单晶, 以(0001) 6H-SiC 为衬底生长的 3C-SiC 膜中缺陷较少, 介面很陡。

SiC 膜可通过扩散、离子注入或原位生长的方法进行掺杂。由于杂质在 SiC 中的扩散很慢, 要求长时间高温扩散, 且无合适的高温扩

表2 SiC 的特性

性 质	Si	3C-SiC	6H-SiC	金刚石
禁带宽度 (300K)(eV)	1.12	2.35	2.86	5.45
导热系数 (W/cm·K)	1.5	5	5	20
电子速度 (max)(cm/s)	$1 \times 10^7$	$2.5 \times 10^7$	$2.0 \times 10^7$	$2.7 \times 10^7$
电子迁移率 ( $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ )	1500	800—1385	600	1900
空穴迁移率 ( $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ )	450	100	50	1200
击穿电场 (V/cm)	$3 \times 10^3$	$5 \times 10^4$	$5 \times 10^4$	$1 \times 10^7$
介电常数	11.8	9.7	10.0	5.5
最高结温(°C)	~250	~1000	~1000	~1000
Johnson 指数	2250	$2 \times 10^{12}$	$1.2 \times 10^{12}$	$1.4 \times 10^{18}$
Keyes 指数	$1.4 \times 10^3$	$8 \times 10^3$	$7 \times 10^4$	$4.3 \times 10^4$

散掩膜,故不宜用扩散方法。在制膜的同时进行原位气相掺杂较为方便,掺B或Al得P型,掺N或P得n型。

已研制的主要器件类型有:

(1) Schottky 二极管: 在(100)Si上生长3C-SiC膜,膜上以Ni或Au作整流接触,其势垒高度分别为1.15和1.11eV,整流特性良好,理想因子为1.4—1.6。

(2) p-n结: 在n-SiC/p-SiC/Si结构中,以Al-Si作P型接触,Ni作n型接触。二极管的室温开启电压为1.2V,5V时的反向漏电流为 $5\mu\text{A}$ 。该p-n结可在500°C工作。据CREE公司报道,这种二极管的抗 $\gamma$ 射线辐射能力为Si器件的三倍。该公司制作的高压(1400V)p-n结的反向回复时间仅20ns。

(3) MESFET: 第一只 $\alpha$ -SiC MESFET是Muench等在1977年制成的,用液相外延方法在P型SiC晶体上生长n-SiC,用Al-Si合金作欧姆接触,栅极则用Ti/Au,观察到电流饱和。第一只 $\beta$ -SiC MESFET则是Yoshida等在1986年制成的,在p-Si上外延生长P型 $\beta$ -SiC,再生长一层非故意掺杂的n型层,最大跨导为 $90\mu\text{s}/\text{mm}$ 。后来,虽然器件的性能不断改善,但寄生阻抗仍然很大。此外,在小信号结型FET和MOSFET等器件方面也制成了一些可在350°C以上工作的原型器件。

(4) 异质结双极型晶体管(HBT): 这是不久前试制成的一种重要的器件。在n-Si衬

底上外延生长n型 $\beta$ -SiC,并刻蚀成 $250\mu\text{m}^2$ 的发射极,在其四周氧化并注入B形成基区,以Ni作为它们的电极,而用Al作集电极。发射极电流增益达800,理想因子为1.1。有意义的是,在 $\beta$ -SiC/Si界面上大量的位错不会使HBT的特性恶化。

除上述器件外,CREE公司还制成了亮度很高的SiC蓝光发光管以及量子效率达70%的SiC紫外光探测器,暗电流特别小。

### 三、III族元素氮化物<sup>[1,4]</sup>

III族元素氮化物是指III族元素和氮形成的氮化物,如BN,AlN,CaN,InN等,它们可以通过掺杂而成为半导体,其禁带宽度在1.95eV(InN)至6.4eV(cBN)之间,且因为III族元素和N之间的原子键很强,适合于制作大功率、高温器件及光电子器件。过去十年中,随着发光管及半导体激光器的产业化,人们对这一类半导体产生了浓厚的兴趣,它们非常适合于从可见光到远紫外的光电子器件。下面对几种氮化物半导体作简要的评述。

#### 1. 立方氮化硼(cBN)<sup>[5]</sup>

BN在自然界不存在。1961年Wentorf首先合成了BN,指出它有三种结构形态,即六方的类石墨结构,纤维锌矿结构(hBN)和立方的闪锌矿结构(cBN)。1977年Sokolowski在低压非平衡条件下合成hBN时,发现其中含有少量cBN,其禁带宽度为6.4eV。后来发

展了多种技术,试图淀积纯 cBN 膜,但结果不尽如人意,主要是多晶 cBN 膜中含有非晶态的或六方相 BN。最近 Doll 以热压或热解的 BN (石墨结构)为靶,用激光蒸发方法在 400°C 的 (001)Si 衬底上外延成功 cBN 膜,只是膜中含有大量的直径为 20—40nm 的针孔,以缓解内应力。不过仍存在 (011) cBN/(001)Si 择优取向,因为在这种匹配条件下, Si 晶面间距的三倍约等于 cBN 的二倍。cBN 原先主要用于耐磨耐蚀涂层及绝缘或纯化层,但由于 cBN 中可存在 n 型或 p 型浅能级,因此对其半导体应用产生了兴趣。目前已用高压法制成了 p-n 结,用温差法在掺 Be 的 p 型 cBN 籽晶上外延生长掺 Si 的 n 型 cBN,电阻率分别为 1—10<sup>2</sup> Ω·cm 和 10—10<sup>3</sup> Ω·cm,该 p-n 结的整流特性良好,并可在 650°C 稳定工作。后来,在这类 p-n 结上观察到发光现象,正偏压时透过 n 型区用肉眼可见到 p-n 结界面发出灰蓝光,亮度稳定,发射光谱在 185—650nm 范围内,发光效率估计为 10<sup>-6</sup>。据称,这是用高压法制作的第一只光电子器件,但要达到实用阶段,在晶体均匀性和接触等方面还需要做大量的工作,同时,对其复合机制也不甚了解。

## 2. 氮化铝 (AlN)

AlN 的禁带宽度为 6.28eV,是直接带隙,非常适合于紫外窗口及光电子器件。在所有材料中,AlN 的表面声波速度最高( $V_R = 6.2\text{km/s}$ ,  $V_L = 12\text{km/s}$ ),特别适宜于表面声波器件。此外,AlN 的化学稳定性高,硬度大,能透过红外直至紫外光,导热系数高,介电常数 9.0,这些性能使之可用于声光器件、高温高压传感器、热沉及半导体芯片的衬底。

但是,困难在于迄今无法制备好的单晶锭,因而众多的研究者致力于直接生长单晶 AlN 单晶膜。在各种制膜技术中,CVD 方法用得最普遍也最为成功。以 (0001) 蓝宝石为衬底,在 1200°C 时可获得 AlN 单晶膜。但总的说来,膜的质量不高,缺陷多,表面不光滑。主要原因是 AlN 膜与蓝宝石的膨胀系数差别大,而且它们膨胀系数的各向异性正好方向相反,

即 AlN 的  $\alpha_{\perp c} > \alpha_{\parallel c}$ ,而蓝宝石的  $\alpha_{\perp c} < \alpha_{\parallel c}$ 。

从气相外延 AlN 单晶膜观测到电致发光,发光峰位于 3.3eV,量子效率为  $6 \times 10^{-6}$ 。

## 3. 氮化镓 (GaN)

GaN 是 III 族元素氮化物中研究得最充分的,它具有立方和六方两种结构,禁带宽度分别为 3.26 和 3.45eV。目前已能用多种 CVD 技术生长 GaN 膜,常以蓝宝石为衬底,但其晶格常数和膨胀系数分别比 GaN 大 23% 和 25%,这势必影响薄膜的质量,故目前试图以 AlN 作过渡层。在掺杂方面,加入 Cd, Be, Zn, Mg, Ge 和 Si 可得 n 型,但迄今未能成功地获得 p 型 GaN。新近有报道称用低能电子束辐照方法得到 p 型 GaN,并制成了 p-n 结发光管。

GaN 主要应用于发光器件、紫外激光器及各种压电、光电、声光调制器。

AlN 和 GaN 可形成连续固溶体  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ,其直接带隙可在 3.45—6.28eV 之间连续变化,这对紫外光电子器件极为有用。GaN/ $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$  异质结(单结)的迁移率在 77K 时达到  $460\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ,比 GaN 体材( $19\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ )高得多,这主要是由于在界面上存在二维电子气的原故。与  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  一样,预计在各种量子阱结构中  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  也将可大显身手。

## 四、问题与展望

综上所述,发展宽禁带半导体是当今高技术发展的迫切需求,市场预测表明,未来十年中高温半导体需求将以很高的年率递增,这也正是过去十年内在这方面的研究与开发进展迅速所引起的。在本文述及的半导体中, SiC 是研究历史最长也是最成熟的材料,上世纪末 SiC 的合成就已达到工业规模,60 年代已用来制作发光管。GaN 的研究也较深入,薄膜质量较高。自从近年来金刚石膜合成之后,由于它的全面性能极佳,故对金刚石器件的期望更高,以致有人埋怨高温超导体的发现将金刚石膜的成就掩盖了。殊不知,金刚石热潮又大大转移了对 SiC 等高温半导体的注意力。

实际上,以器件的要求来衡量,在高温半导体获得大规模应用之前,还必须解决一些严峻的问题,我们讨论几个带普遍性的问题。

### 1. 单晶外延膜的质量

各种高温半导体单晶膜的质量都不高。金刚石在异质衬底上的外延未获突破性进展,同质外延虽获成功,但膜内含有许多孪晶、层错及生长台阶。cBN 膜也有类似的情况。III 族元素氮化物一般可在蓝宝石上外延,但膜的缺陷浓度尚高。

提高单晶膜质量的主要途径有二:一是改进制膜技术,二是制备适用的衬底。受薄膜的膨胀系数,晶格常数等本征特性的限制,在改进制膜技术方面的回旋余地有限。在衬底选择方面,同质衬底固然是理想的材料,但金刚石、cBN 单晶体积小,价格贵,显然不可取。除  $\alpha$ -SiC 外,其余单晶的质量都很差。因此采用异质衬底加过渡层可能是一种现实可行的方法。

### 2. 掺杂

掺杂是制备电子器件不可避免的工艺之一。GaN 的 n 型掺杂是成功的,但 p 型掺杂极为困难。与此相反,有 p 型金刚石却无 n 型金刚石。从原子尺寸来考虑,只有 N 可作施主,但 N 却极易与空位形成各种深能级缺陷中心。看来,在这些半导体的掺杂方面,有必要探索与传统半导体不同的方法如间隙掺杂、杂质与某种

缺陷的复合等。相比之下, SiC 及 cBN 在掺杂方面的进展要顺利一些。

### 3. 器件相关工艺

器件制作包含多项工艺,它们都有一些特殊的要求。目前上述半导体材料的接触、绝缘层、扩散、离子注入、刻蚀乃至布线、封装等工艺的研究尚属起步阶段,许多材料问题和工艺问题有待解决。此外还需注意各单项工艺的相容性及高温工作环境带来的影响。

在基础研究方面,对于上述材料的生长动力学,高温半导体材料中的缺陷能级与载流子输运机制,由于某些材料无本征氧化物而必需采用非传统的器件设计等问题,都迫切需要开展深入的工作。

总之,高温半导体材料与器件的研究进展很快,曙光在望,前途光明,经过不懈的努力,在未来的十年中必将会有突破性的进展。

(上接第 537 页)

的算法,不过找到一种对费米体系行之有效、适用性较强的新算法仍是有待于解决的最重要的问题。第二,略去低温时计算量之大令人望而生畏不谈,低温时量子蒙特卡罗方法不稳定,玻尔兹曼权重因子会出现负号。当然这些问题有的已得到部分解决,也可以相信这些问题在不久的将来会得到妥善的解决。

十年前,仅有几位物理学家在摸索如何把蒙特卡罗方法用于量子体系的研究。而十年后的今天,量子蒙特卡罗方法已被许多物理学家所采用,这种方法本身和它取得的成果已受到极大的关注。量子蒙特卡罗方法方兴未艾,可以相信在下个十年里它会得到更大的发展。

- [1] M. Sano and M. Aoki, *Oyo Butsuri*, **52** (1983), 374.
- [2] R. F. Davis et al., *Mater. Sci. Engng. B*, **1** (1988), 77.
- [3] Diamond, Silicon Carbide and Related wide Bandgap Semiconductor Eds. J. T. Glass, R. Messier and N. Fujimori, MRS (1990).
- [4] R. F. Davis, *Proc. IEEE*, **79** (1991), 702.
- [5] S. P. S. Arya and A. D'amico, *Thin Solid Films*, **157** (1988), 267.

- [1] N. Metropolis et al, *J Chem. Phys.*, **21**(1953), 1087.
- [2] K. Binder, ed, Monte Carlo Methods in Statistical Physics, Springer-Verlag, Berlin, (1979)
- [3] C. Dargnpta and K. L. Yao, *Phys. Rev. B*, **29**, (1984), 4071.
- [4] M. Suzuki, S. Miyashita, and A. Kuroda, *Prog. Theor. Phys.* **58**(1977), 1377.
- [5] M. Suzuki, Quantum Monte Carlo Methods in Equilibrium and Nonequilibrium Systems, Springer-Verlag, (1987)
- [6] J. E. Hirsch, D. J. Scalapino, R. L. Sugar, and R. Blankenbecler, *Phys. Rev. Lett.*, **47**(1981) 1628.
- [7] R. Blankenbecler et al., *Phys. Rev. D*, **24**(1981), 2278.
- [8] J. F. Hirsch, *Phys. Rev. B*, **38**(1988), 12023
- [9] W. von der Linden et al., *Phys. Rev. B*, **41**(1990), 4669.
- [10] S. R. White et al, *Phys. Rev. B*, **38**(1988), 11665.
- [11] H. B. Schüttler et al., *Phys. Rev. B*, **39**(1989), 6501.