

超导体/二维空穴系统隧结的 实验研究.

段力, 郑厚植.

中国科学院半导体研究所.

半导体超晶格国家实验室.

早期的学位论文都是用手写的方式完成的, 这个早指的是80年代。这是一种比较基本的训练, 在那个时代是迫不得已。但是现在看来这种书写的方式对于写作的严谨性和思维逻辑的一致性和缜密性是有益处的。

那时候字写得还不好看, 但是整个的节奏还算工整。关于整个文章的推理和态度, 还是可以的。

摘要

作为新一代约瑟夫逊器件研制与开发的基础, 率先研制成功了“透明度”较高的超导体/二维空穴系统隧结, 为解决国际上制作约瑟夫逊高速器件过程中普遍遇到的超导/半导体之间欧姆接触的难题提供了一种新款并且切实可行的方法。对该结的电流-电压特性进行了测量并进行了系统的分析。

中国科学院半导体研究所科研报告

共 13 页第 2 页

一. 引言.

在超导电性的实际应用中, 超导电子学是一个很重要的方面。超导电子学主要是指约瑟夫逊效应 [1] 的各个应用领域。在这些领域中, 约瑟夫逊结作为计算机元器件的潜力尤为引人注目。[由于约瑟夫逊隧道结作为开关器件的开关过程是量子过程, 开关时间约为 $\sim \hbar/2\Delta$, 其中 $\hbar$ 为普朗克常数, Δ 为超导体的超导能隙, 一般为几个毫电子伏特。对于超导体铅, $\Delta \sim 1.2 \text{ meV}$, 所以开关时间 $\sim 0.27 \text{ ps}$. 开关速度是其他半导体器件所不能比拟的。(目前一般半导体

中国科学院半导体研究所科研报告

共 13 页第 3 页

无器件的开关速度约为几十至几千个 ps)。此外,约瑟夫逊结的另一个突出优点是功耗极小;约为 $1\mu\text{W}$ 左右。(而半导体逻辑器件的功耗约为 1mW 左右)。速度和功耗是衡量半导体器件性能乃至整个电子系统性能的重要参数。所以我们可以看到约瑟夫逊器件所显示出的突出^①的优越性。

特别是

近年来,将约瑟夫逊效应与 MOS 场效应晶体管相结合,利用 MOSFET 中栅的作用来调制约瑟夫逊结的超导电流,同时利用半导体较之于金属的弱导电性来提高开关结“开态”的电阻值,

中国科学院半导体研究所科研报告

共 13 页第 4 页

[2, 3]

形成了所谓的约瑟夫逊场效应晶体管。^[2, 3]这种晶体管通过半导体将二个挨得很近的超导~~电极~~电极(源和漏)利用超导近邻效应弱耦合起来,这种弱耦合的存在^和强弱与否与半导体内的电子状态密切相关。利用半导体材料的调制导电性,即可调制超导弱耦合效应,从而达到^{控制}作用。半导体材料的选择对于^{这种}器件的性能和实用性皆有很大影响。一般的来说,选择高迁移率,高载流子浓度的材料有利于器件速度的提高,而选择与超导材料有较“透明”的接触界面的材料作为耦

中国科学院半导体研究所科研报告

共 13 页第 5 页

合介质的有利于器件的制作或工艺实现。

我们选中 $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ 调制掺杂结构中的二维系

统作为耦合介质来实现约瑟夫逊高性能器件。

较之于目前国际上普遍使用的耦合介质，调制掺杂结构以其特有的高迁移率，高载流子浓度具有很大的优势。

这种器件结构的实现其关键问题是调制掺杂的二维系统与超导体相接触的“透明性”问题。所谓“透明性”是指超导体对可以较少衰减地穿过超导体/半导体接触界面。我们知道超导体(金属)与半导体

进入半导体的能力

中国科学院半导体研究所科研报告

共 13 页第 6 页

体材料接触时多数会产生肖特基势垒。这个势垒的存在会大大削弱二个超导体之间超导电子的耦合。

要想实现约瑟夫逊效应，首要任务是要减弱肖特基势垒对超电子对的阻碍作用，即增加“透明度”。

在本文中，我们系统研究了超导体/二维空穴系统的隧穿特性，实现了透明度较高的超导体/二维空穴气系统的隧道结，为进一步实现高性能的约瑟夫逊器件打下了良好的基础。

中国科学院半导体研究所科研报告

共 13 页第 7 页

二. 样品制作

我们选择金厚铅作为超导体, 铅的超导转变温度

为 7.2 K。二维系统我们选择 ^PP-AlGaAs/GaAs 异质结调

制掺杂形成的二维空穴气。较之于 N 型的二维电子气

P 型的空穴系统与金厚接触势垒要低 (约低 0.3~0.4 eV)

这便于我们做出“透明度”较高的超导体/二维系统

隧道结来。尽管如此, 铅与二维空穴气的接触势垒

仍有 0.3 eV, 仍是一个肖特基整流接触。所以我们在

铅中掺一些铋, 在合金过程中使铋与接触区扩散成 P^{++}

区从而形成隧道结, 这个做法与作欧姆接触有些类似。
(将空变)

中国科学院半导体研究所科研报告

共 13 页第 8 页

在同一样品上除制作二个铅/二维空穴气隧边结之外,还制作了一个欧姆接触结作为欧姆接触良好与否的检测,一个铅金层电阻条来检验超导电性的存在。在样品插入液氮中进行测量之前,先将样品在液氮中进行常规的欧姆接触测量。合格的样品在液氮温度下电阻值将降至室温时的^{至十几倍}几分之一,并且二个欧姆电极之间的互反向电阻对称性很好。

样品的制作过程如下:

参考图1所示的样品平面图与图2所示的超导体与二维空穴气隧边结的剖面图。首先将用MBE方法长成的

中国科学院半导体研究所科研报告

共 13 页第 9 页

P-AlGaGa/GaAs 异质结样品表面通过光刻腐蚀成包含
六个电极的样品桥, 腐蚀深度约为 $1\sim 2\mu\text{m}$ 。在第一次
光刻后用光刻胶作为掩蔽用稀腐蚀液将样品腐蚀
 $800\text{\AA}$ 左右, 使浅露出二维空穴气截面。随后立即将样
品送入真空镀膜台, 镀上 $1000\text{\AA}$ 左右的铅-锌合金膜,
合金的配比为铅: 锌 = 4:1。镀膜后将样品放入丙
酮中, 光刻胶被丙酮溶化, 其上的金属自行剥落,
从而形成 3 超导(铅) & 二维空穴气隧道结, 与此同时也形
成 3 铅超导电阻检测条。片子清洗之后, 在二个欧姆电极上

参考文献

(电极), 4) 点焊二个铅-锌合金球, 之后将样品在氮气保护

中国科学院半导体研究所科研报告

共 13 页第 10 页

合金2', 合金温度为 410°C 。用金丝将样品与样品架连接好以待测量。

三. 实验结果和分析.

对很多样品进行了测量, 实验结果重复性很好。我

们重点测量了超导体铅/二氧化硅隧道结在一个不同温

度状态下的电流电压特性。一个状态是超导态(超导电阻

系呈零电阻); 另一个状态是刚从超导态的正常态(超

导电阻系在此点呈现零到几十个欧姆的突变)用铂测

温电阻测得此时的温度是 6.9K , 这对应铅-铋合金的超

导转变温度, 它比铅的转变温度低 0.3K 。图3图4示出了结果。

中国科学院半导体研究所科研报告

共 13 页第 11 页

我们看到:

1. 当样品处于超导态时, 铅/二维空穴气隧道结呈现出预期的电流-电压非线性, 非线性阈值 $\sim 1.5 \text{ mV}$, 与铅的超导能隙 1.3 meV 很接近; 而当样品处于正常态时, 铅/二维空穴系统呈现完美的线性, 说明该隧道结的欧姆接触做得很好, 同时也证明超导态下出现的非线性电流-电压特性是由超导隧穿引起, 而不是由欧姆接触不好造成的。

2. 无论是样品处于超导或正常态, 二个欧姆接触电极之间的电流-电压特性始终是线性, 表明电极/4的

中国科学院半导体研究所科研报告

共 13 页第 12 页

欧姆接触电极做得很好, 从而进一步证明铅/二维空穴气隧道结的电流-电压非线性是由于超导体与二维体系之间的隧穿特性引起的。

图5的量子霍尔效应的测量结果说明二维空穴气的存在性。霍尔桥是在同一异质结芯片上制作的。量子霍尔效应测得的二维空穴气电荷密度为 $N_s = 3.85 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, 迁移率为 $6.87 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 。

四. 结 论.

制作、测量并分析了超导体铅与二维空穴系统隧道结的超导量子隧穿特性。在低温超导状态下, 该隧道结

中国科学院半导体研究所科研报告

共 13 页第 13 页

呈现出非线性的电流-电压特性, 非线性阈值接近超导体铅的能隙宽度。超导隧穿结的成功制作, 为我们下一步的制作新一代集超导体与超晶格异质结之大成的约瑟夫逊高速超导器件打下了扎实的基础。

参考文献

[1]. B. D. Josephson, *Phys. Letts.*, **1**, 251 (1962)

[2]. A. W. Kleinsasser, T. N. Jackson, D. McInturff, G. D. Petit, F. Rammo & J. M. Woodall, *Appl. Phys. Lett.*, **55**, 1909 (1989)

[3]. T. Nishino, M. Halamo, H. Hasegawa, F. Murai, T. Kure, A. Hirama, K. Yagi, and U. Kawabe, *IEEE*, EDL-10, **17** 61 (1989)

中国科学院半导体研究所科研报告

共

页第

页

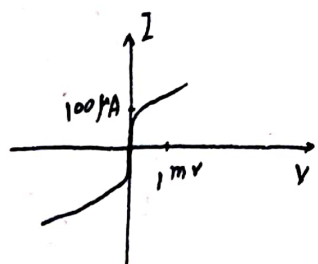
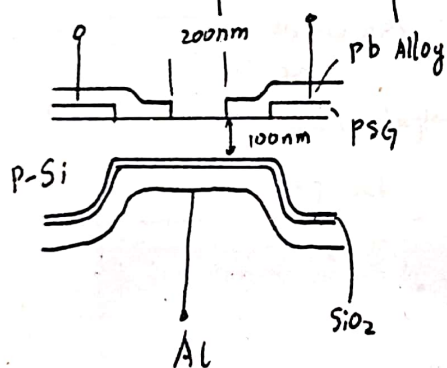
题

一九七七年十二月入学时，郑厚植先生提出选题意见，如下：

T. Nishino 等在 $1E^3$ EDL 上发表了题为

Three-terminal Superconducting Devices Using a
Si Single Crystal Film. 一文。

文中提出了一种新的器件结构：



在重掺杂的 P-Si 衬底上 ($8 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$) 制作如左图所示结构。控制背栅压使沟道中具有一定浓度的载流子时，在超导体条件下，二个 Pb 合金超导电极之间会产生 Josephson 效应。

控制背栅压使沟道载流子耗尽时，通过半导体中 P-载流子的 Josephson 效应便不会发生。

以上二个不同的状态是两个不同的开关状态。

受此文启发，郑先生提出：

用 20EG (GaAs/GaAlAs 系统) 代替 P-Si，来实现

此种结构。具体是：

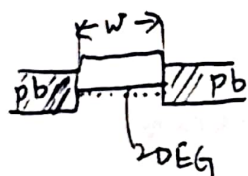
中国科学院半导体研究所科研报告

共

页第

页

用 GaAs / GaAlAs 异质结结构用 lift-off 法形成栅电极。由于 GaAs

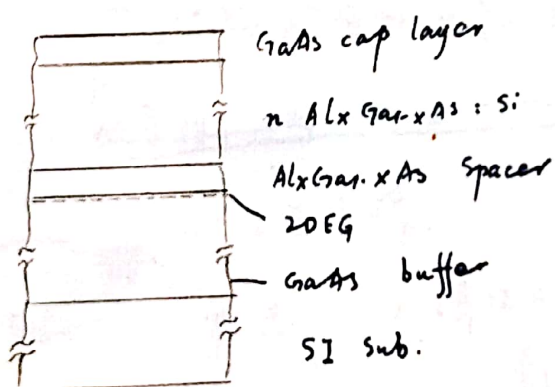


由于 GaAs 系统的 2DEG 的迁移率在 4.2K 低温条件下

比 p-Si 要大几个数量级。所以可把二个 Pb 电极之间的

超导结长度加长到 1 μ -2 μ 。这样在目前的工艺条件下 (

光刻与剥离的可行范围内) 实现这种器件结构。



中国科学院半导体研究所科研报告

共

页第

页

样品的制备工作。

我们用的是 $n\text{-AlGaAs/GaAs}$ 异质结构。由于片子很少。我 ~~又~~ 是问接触 GaAs 22 郑先生建议我先做 2 号实验。用体 GaAs 片子先熟悉 GaAs 2 号。 ~~然后~~ 这用去半年时间（即 1988 年上半年）下半年开始用 6 号片子做样品。

具体步骤为：

1. ~~对 GaAs 腐蚀速率的研究。~~
心子性： ~~对我的实验材料，首先~~

2 号步骤：

第一天：

1. 清洗片子。

三氯乙烷超声 = 次，每次 2'-3'

丙酮超声 = 次，每次 2'-3'

无水乙醇超声 = 次，每次 2'-3'

去离子水超声 = 次，每次 2'-3'

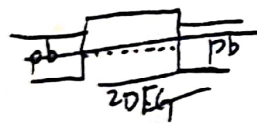
2. 粘片。用磨光剂胶将片子粘在大硅片上。（因为片子很小，不能进行电胶）放烘箱中烘 20' (70°C) 将胶固化。

3. 开光刻机预热 20'

4. 甩胶 转速 2000

5. 烘胶 70°C 20'

6. 配置显影液。显影液 1 份配 2.5 份的去离子水并搅拌均匀。



中国科学院半导体研究所科研报告

共

页第

页

光 I
7. 曝光 40"-50" 显形. 冲洗干净并吹干. 在显微镜下观察显形效果. 若显形不够则需继续显形.

8. 显膜 100°C. 20'.

9. Hall 桥面腐蚀. 光阻
腐蚀液

甲醇 : H_3PO_4 : H_2O_2 = 2 : 1 : 1

搅拌均匀后 将片子浸入腐蚀液中腐蚀 30", 大约 ~~1μ~~^{1μ} 厚.

10. 去胶, 丙酮超声 1', 再用去离子水冲干净.

11. 烘干片子. 烘箱. 70°C. 20'

12. 甩胶, 烘胶 70°C, 20', 关光刻机.

第二天, 开光刻机 系去离子水, 开蒸发器.

2. 配显形液

3. 光刻机预热 20' 后曝光, 显形, 并用显微镜检查曝光效果.
光 II

4. 放入烘箱, 显膜 120', 100°C.

5. 配腐蚀液

甲醇 : H_3PO_4 : H_2O_2 : H_2O = 2 : 1 : 1 : 12.

将样品放入腐蚀液泡 3", 冲净. 吹干.

6. 显膜 20', 100°C.

7. 用天平称 32mg AuGeNi

8. 蒸发, 剥离, 冲洗干净

中国科学院半导体研究所科研报告

共

页第

页

9. 合金 450°C . $5'$ 并用探针台测试 Ω 接触情况.
10. 将片 ϕ 在 70°C 烘箱中烘 $20'$
11. 甩胶, 先用 π 陪片.
12. 烘 $10'$ 70°C .
13. 漂氯苯 $15'$ 后吹干.
14. 前烘 $20'$, 70°C .

第二天:

1. 开光刻机预热, 开蒸发台, 要去离子水
2. 按 $1:2.5$ 配好显影液后开始曝光. 先用陪片曝光 $40''$, 显影后效果良好的再用正式片 ϕ . 正式片应比陪片稍多 $2''-3''$.
3. 显影后用显微镜检查后在 100°C 下坚膜 $20'$.

4. 配好腐蚀液,

甲醇: H_3PO_4 : H_2O_2 : H_2O = $2:1:1:6$.

将片 ϕ 腐蚀 $30''$, (大约腐蚀掉 $1500\text{\AA}$) 用大号去离子水冲洗干净. 并吹干.

5. 坚膜 $20'$, 100°C .

6. 称 pb 合金: pb 15mg , zn 6mg 约 $1100\text{\AA}$ 厚.

7. 蒸发剥离

8. 合金 410°C . 氯气, $45''$

9. 切片, 点 zn 焊条.

中国科学院半导体研究所科研报告

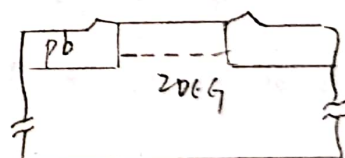
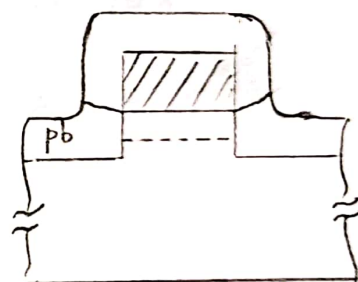
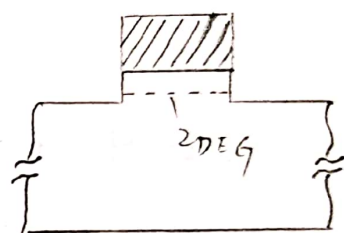
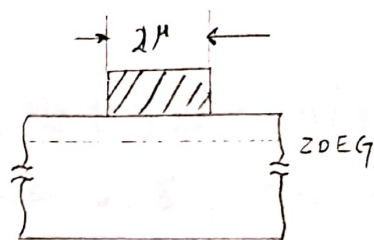
共

页第

页

对 α 点的几点解释. Josephson 结的形成方法.

1. 光刻出 1μ (2μ) 的线条,
2. 将 αOEG 府蚀出来.
3. 蒸发 PbIn 电极.
4. 用 Lift-off 方法将光刻胶上的 PbIn 剥离下去.
5. 合金, 以形成 Ω 接触.



工艺关键点及难点:

1. 线条宽度
2. 府蚀深度.
3. 蒸发 PbIn 的厚度.
4. 细线条的剥离
5. 合金的程度及条件.
6. Pb 的氧化问题.

中国科学院半导体研究所科研报告

共

页第

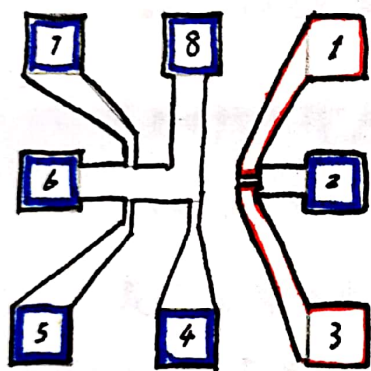
页

在以上2号中, 有以下几步工艺是需调整的.

1. 制版.

基本思想: 在版面上有一个 Josephson 超导结, 用做邻近超导效应的测量.
在版面上有一个 QHE 测量桥. 以测量 2DEG 的基本特性 (n , μ 等) 以作为将来分析时的依据.

版图式样:



— 黑线: 版 I, 阴版.

— 兰线: 版 II, 阳版.

— 红线: 版 III, 阳版.

说明: 1. 一共几个引出脚. 1, 3 是超导测量结的引出端. 2 端可用来做栅, 控制 2DEG 浓度. 4-8 是一个 Hall 桥. 用来测量 2DEG 的载流子浓度与迁移率.

2. 1, 3 之间的线距起初定为 $2\mu\text{m}$. 原因是我们现有的光刻机 (国产劳动牌) 只能线宽 $2\mu\text{m}$, 另外考虑到剥离何困难. 对 Pb 合金而言, 线条过细可剥离比较困难.

后来我们因通过测量及其对文献的调研, 觉得 $2\mu\text{m}$ 太宽, 于是又重新制版. 这次是在微电子中心陈金钦处刻的铜版. 样子与上面差不多. 只是 1, 3 之间的宽度改为 $1\mu\text{m}$.

中国科学院半导体研究所科研报告

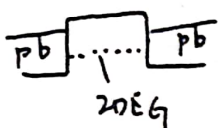
共

页第

页

2. 对 GaAs / AlGaAs 异质结结构 府蚀速率的实验摸索.

必要性: 要得到超导 Josephson 结, 我们必须使 Pb 合金超导电极与



20EG 的侧向相接触. 所以对片上的府蚀必须有一定的深度.

我们又需对 $2\mu\text{m}$ 乃至 $1\mu\text{m}$ 的线条, 尤其是 ~~这些~~ Pb 合金的软

金属电极作剥离. 如果府蚀得太深, 势必金属合金层

变得厚一点, 而这会给细线条和剥离带来极大的困难.

所以府蚀深度不能过厚.

∴ 首先必须选择府蚀深度.

∴ 20EG 的深度约为 $800 - 1000 \text{ \AA}$.

∴ 我们选府蚀深度为 $1500 \text{ \AA}$. Pb 合金的厚度控制在 $1000 \text{ \AA}$.

具体工艺步骤为:

① 选择府蚀液的浓度以降低府蚀速率以便控制. 配方为

甲醇: H_3PO_4 : H_2O_2 : H_2O = 2:1:1:6

② 对 GaAs 体材料及 AlGaAs 体材料用上述腐蚀液进行各

所腐蚀. 并用外室的分光光度计进行测量. 对多次测

量进行归纳平均统计

腐蚀速率 $\sim 67 \text{ \AA} / \text{Sec}$.

中国科学院半导体研究所科研报告

共

页第

页

3. 电极蒸发厚度的控制。

蒸厚了, 剥离不下来, 蒸薄了, 与 DPF 耦合不上。所以, 有必要选择蒸发厚度。

我们目前还没有膜厚测量控制仪, 所以全靠自己在实践中摸索。

① 对重量为 m 的被蒸发层, 应有关系

$$m = \rho \cdot A \cdot S.$$

其中 ρ 为蒸发层比重, S 为有效蒸发面积, ^{决定于} 由所蒸发层四边与样品的矩离。对某个系统, S 是不变的。 A 为膜厚。

根据数据: 蒸 Au 重量为 54 mg, 厚度为 1800 Å

$$\text{则 } \rho_{Au} \cdot S = 0.03 \quad \text{即 } \rho_{Au} = 19.3 \text{ g/cm}^3$$

$$\therefore S = 1.5544 \times 10^{-3}$$

$\therefore$ 要得到厚度为 A 的膜厚, 须在四边放

$$m = 1.5544 \times \rho (\text{g/cm}^3) \times A (\text{Å}) \times 10^{-3} (\text{mg})$$

的余层。

② 对于合金 若合金后的体积为合金前 = 若体积之和。则合金的比重为

$$\rho = \left(\frac{M_1\%}{\rho_1} + \frac{M_2\%}{\rho_2} \right)^{-1}$$

$$M_1\%, M_2\% \text{ 重量比} = \frac{M_1}{M_1 + M_2} \% \text{ 和 } \frac{M_2}{M_1 + M_2} \%$$

中国科学院半导体研究所科研报告

共

页第

页

实验蒸发时合金的体积可能不是二者之和，所以以上值只是作为一个第一次实验的参考。可以在实验中确定 ρ 值，并求得 $m \sim A$ 的线性关系。

在这个实验中我们取：

$$m_{pb} : m_{zn} = 3 : 1$$

$$\text{若膜厚为 } 1200 \text{ \AA} \text{ 则 } m = 30 \text{ mg}$$

$$\text{则 } m_{pb} = 23 \text{ mg}$$

$$m_{zn} = 7 \text{ mg}$$

4. Lift-off 剥离 $2\mu\text{m}$ 线条。

这是样品制作的关键^较步骤，亦是~~最~~困难的一步。它的第一步是先蒸光刻胶 $2\mu\text{m}$ 的线条。当然还要求对准。然后是图形时间的掌握。第二步是剥离得完整。我们在光刻前先用氯苯漂一会。氯苯会在被曝光的光刻胶表面形成较难显影的一层，从而使得显影后的光刻胶呈倒楔子形  以便于将来的剥离。尽管如此，有时蒸发时控制得不好，线条亦很难剥下来。可能是所蒸发金属层过热将胶表面烫坏了以至于不溶于丙酮，无法剥离。

这一步的成功率不是 100% 的。弄不好就得从新开始。

中国科学院半导体研究所科研报告

共

页第

页

5. 蒸发与合金, Ω 接触口形成.

蒸发时使用用的是真空蒸发台. 先开电源, 开机械泵, 并打开真空计. 先抽系统, 真空达 4×10^{-2} 后开扩散泵, 并开冷却水. 开钟罩并放入样品及被蒸金属. 降钟罩, 抽钟罩, 真空达 1×10^{-2} 时开3调, 并推入钟罩, 系统关门, 开3真空规表, 去气1'. 校准, 调零, 调发射后拨入调零. 真空到 3×10^{-5} 时开始衬底加热. 电压40V. 加热10'后, 真空达 2×10^{-5} 时开始蒸发. 认准系蒸发的电极, 将铜棒插入该电极使其短路, 并回^{降下}加热电压, 并隔^{玻璃}锅^{玻璃}看^{观察}况, 直至^{下降}中金属熔化乃至消失. ~~关掉~~电压, 去衬底加热电压. 关真空规表, 关3调, 关扩散泵, 等30'后可以取片子. 最后可关水及电源.

合金使用的是合金炉. 采用热电偶测温并进行PID温度控制. ~~热电偶~~电压与合金温度有一定的对应关系. 但应考虑室温效应. 升温时参考厂家提供的电压温度对应表, 并考虑室温以确定加热电压. 例如: 你系在 450°C 合金5', 那么你先在V-T表中查 $450^{\circ}\text{C} - 30^{\circ} = 420^{\circ}\text{C}$ 对应的^{热电偶}电压. 中室温是 30°C . 值. 并将^{热电偶}加热电压^{控制}, ~~在已表上~~. 使热电偶电压维持在设定点上.

若在V-T卡片上查不到. 则可按下式计算.

$$V = k(T_{\text{要求}} - T_{\text{室温}})$$

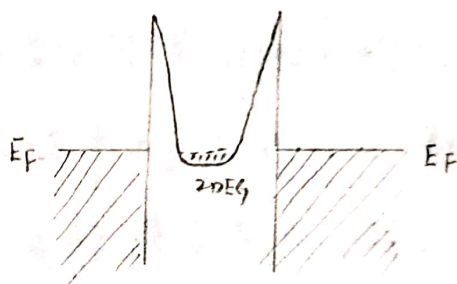
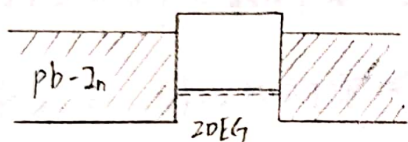
$$k = 0.086 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}.$$

其中 T 表示是你要求的合金温度。

T 室温是室温。

V 是 ~~电压表~~ 电压表上指示的热电偶电压。

合金是本材料制作的一项最复杂同时又是最难的工作，因为它是在寻找一个临界点。此其难之所立矣。具体是：



在淀积 Pb-In 超导膜后，在此膜与 2DEG 之间有一 Schottky 势垒。高度约为 0.6 V。若 2DEG 浓度 $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ ，则估计 Schottky 势垒厚度为

$$x_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_D}} (V_{bi} - V) = 3.81 \times 10^{-4} \sqrt{\frac{V_m}{N_D}}$$

$$N_D = (5 \times 10^{11})^{\frac{2}{3}} = 3.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2} = 3.5 \times 10^{23} \text{ m}^{-2} \quad \times$$

$$V_m = 0.6 \text{ V}$$

$$\therefore x_D = 3.81 \times 10^{-4} \times \sqrt{\frac{0.6}{3.5 \times 10^{23}}} = 500 \text{ \AA}$$

对应隧穿几率

$$T = \exp\left(-\frac{x}{l}\right) \left(\frac{2 \times 0.063 \times 9.1 \times 10^{-31}}{(1.055 \times 10^{-34})^2} \right) (1.6 \times 10^{19} \times 0.6)^{\frac{1}{2}} 5 \times 10^{-8} \\ = 1.6 \times 10^{-28}$$

注：以上只是估计。事实上，Pb-In 与形成 2DEG 有关的 AlGaAs 层形成 Schottky

其 2DEG 性质会因此发生变化。

中国科学院半导体研究所科研报告

共

页第

页

$$T = \exp\left(-\frac{\epsilon}{3} \cdot \frac{(2m)^{1/2}}{\hbar} \cdot (eV_b)^{1/2} d\right)$$

对隧穿与绝对优势的总结.

$$x_0 = 50 \text{ \AA}$$

$$\therefore T = 0.008$$

我们器件的功能的实现要靠载流子的隧穿,因此我们要形成隧穿结.因此我们要做合金处理.合金中由于Zn或Sn的扩散会产生混晶与掺杂,以降低势垒高度和减短势垒宽度,提高隧穿几率.有了半透明隧穿,才谈得上 Cooper pairs 的隧穿.

合金的必要性我们谈了.但掌握合金的扩散时间与否却是关键.难点:

1. 合金条件(温度、时间)的掌握.如上实验可看到:合金~~扩散~~^{过头}可能令使二边合金扩散.中间的20%~~扩散~~^{不够}混晶.这对实验研究就没有意义了.而合金~~扩散~~^{不够}又不能形成欧姆接触,满足不了需要.

2. 合金同样会使 Pb-Zn 合金的扩散.这会使 Pb-Zn 合金层的价也变差.在显微镜下观察.在合金后 Pb-Zn 层呈麻点状.在有些实验中已发现这样的合金层已不能导电了.

中国科学院半导体研究所科研报告

共

页第

页

3. 这是作侧向结的 Ω 接触. 成功率较一般 Ω 接触系为得多. 尤其在低温下, (而我们的实验又要求在低温下进行) 因为侧向 Ω 接触的面积比一般 Ω 接触系为得多得多. (侧向 Ω 结面积为 $100\mu \times 0.01\mu = 1\mu\text{m}^2$ 而常规的 Ω 结面积为 $300^2\mu\text{m}^2 \approx 10^5\mu\text{m}^2$)

恒另我们的侧向结的标准是在低温4.2K下仍保持~~线性~~隧穿特性, 即在4.2K时能达到我们的预期效果片子才是合格的. 这要求我们每做一个结就要在低温下检验其合格性. 但是这种随做随检的条件在我们所是不具备的. 因为我们没有液氮. 亦低温至冷系统. 此外这种实验对片子的利用是. 一次性的. 既然不成功片子可能就浪费掉了. 因为取样的结果往往证实如此. 我们的片子来源很有限. 因此这项碰几率的实验对材料的消耗是比较大的.

中国科学院半导体研究所科研报告

共

页第

页

6. 铌的氧化问题.

我们所用的超导金属是铌, 而铌在空气中极易氧化. 在我们的样品实验中这个问题又很突出. 主要体现在.

①. 夏天又湿又热, 我们的样品制作室又不是干燥空调的. 室温很湿, 湿度很高. 这就对以后的制作很不利.

②. 在点焊时, 高温焊铁与片上的 Pb 条接触, 使其氧化. 这会增加铌的氧化. 此不利三.

③. 片上焊好后, 为了要进行实验. 否则时间过长. 铌会自然氧化. 此不利三.

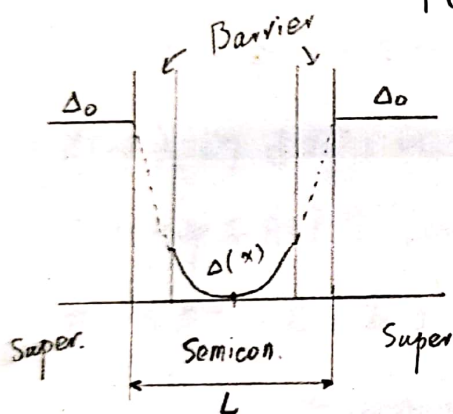
我们没有超净间的条件, 所以赶上一些就要夏天做样品, 那不如干脆这么. 点焊时的过热氧化可用电焊时吹氮气来缓解一些. 但点焊时间也不可过长. 也如果计划内近期不能做低温实验. 那么最好的不多做样品. 因为做出来的样品难以保存.

也考虑过用超导 Nb 代替 Pb. 但一来 Nb 比 Pb 贵, 二来淀积 Nb 需要离子溅射设备, 而我们只有真空镀膜机. 此外光刻胶对 ~~离子~~ 溅射淀积的 Nb 膜是否能承受得住也是个问题.

超导 Josephson 结中 Coherent length or Decay length 之讨论, 最小尺寸极限.

Je. Seto 在 1972 年估计了超导体 / 半导体 / 超导体 Josephson weak link 的相干长度. 相干长度和耗散长度它反映了超导对微扰的幅度的衰减速度.

$$F(x) \propto \exp(-x/\xi_n) \quad \dots (*)$$



Seto 给出

$$\xi_n = \left(\frac{\hbar^3 \mu}{6\pi m^* e k_B T} \right)^{1/2} (3\pi^2 n)^{1/3}$$

对 20EG, 此式应改为

$$\xi_n = \left(\frac{\hbar^3 \mu}{2\pi m^* e k_B T} \right)^{1/2} (n_s)^{1/2}$$

其中 m^* , μ , n_s 是二维电子 (或空穴) 的有效质量. ~~平均~~
由能带结构及载流子浓度.

对 GaAs / p-GaAs 异质结 取

$$\mu = 8 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}.$$

$$n_s = 4 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$$

$$m^* = 0.48 m_0$$

$$T = 2.2 \text{ K}$$

$$\lambda = 0.13 \mu\text{m}$$

由(1)式看到 λ 越大, 波函数在半导体中的衰减越慢, 有利于二巴超导体波函数的耦合, 所以应尽量选择 λ 大的半导体作为耦合介质。

$$\lambda \propto \left(\frac{\hbar}{m}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{n_s}{T}\right)^{1/2}$$

$\therefore$ 提高材料的迁移率, 降低温度, 选择有效质量较小的材料都将有利于提高 λ 。

另一方面由上页图上可以看到, 半导体耦合长度 L 亦不可过长, 即便我们选择 λ 比较大的 λ 的材料, 但 L 过长亦会使耦合长度过小从而不能产生 Josephson 效应。近几年的文献归纳出 L 最大为 $0.5 \mu\text{m}$ 。(见下表) 其其他材料参数为:

~~InGaAs 材料~~

作者	刊物	年月	材料	线宽 μm	
R.C. Ruby.	ED	81.11	p-Si	0.11	
T. Kawakani	APL	85.1	n-InAs	0.5	
T. Nishino.	EDL	85.6	p-Si	0.2	
A.W. Kleinsasser.	APL	86.12	n-InAs	0.26	
Z. Ivanov.	LT18	87.2	p-GaAs/AlGaAs	0.4	
T. Nishino	EDL	89.2	p-Si	0.1	
A.W. Kleinsamer	APL	89.10	n-InGaAs	0.5	

中国科学院半导体研究所科研报告

共

页第

页

其中 ED, EDL 和 APL 分别是 ^{IEE} Electronic Device, IEEE Electronic Device Letter 和 Applied Physics Letter 的简写。

对上面3的估计是粗略的。因为没有考虑余层(超导体)与半导体接触时所产生的 shottkey Barrier。由于超导传输实际包含3个通过超导/半导体接触的 shottkey 势垒的隧穿过程。因此临界超导电流与隧穿几率有关。我们已知隧穿几率 $P \propto \exp(-E_B/E_0)$
 $E_0 = (ek/2)(N_0/\epsilon_0 m^*)^{1/2}$ 所以材料的势垒高度直接影响隧穿几率。
对上面各文献进行分析后可看到大家通常选用 barrier free 的 ZnGaAs 等材料。~~在~~(表面是砷层)或 p-Si 材料 ($E_B = 0.2 \text{ eV}$, $N \geq 10^{19} \text{ cm}^{-3}$)
利用 GaAs/AlGaAs 2DHG 作为耦合半导体的 Josephson 效应器件已由 Z. Ivanov. 于 1987 年制作出。此文献我们在 1988 年年末才查看到。我们的工作比别人要晚。

JOFET 有关文献.

1. A. H. Silver, A. B. Chase, etc. in « Future trends in Superconductive Electronics. » P 364 (1978)
2. T. D. Clark etc. J. Appl. Phys. 51 2736 (1980)
3. T. Nishino etc. IE³, ED-6, No. 6, June (1985)
4. R. C. Ruby etc. IE³, ED-28, No. 11, Nov. (1981)
5. J. Seto, T. Van Duzer, LT13, (1972) P 328
6. T. Kawakami etc. Appl. Phys. Lett. 46 (1), Jan. (1985) P 92.
7. A. W. Kleinsasser, etc. Appl. Phys. Lett. 49 (25), Dec. (1986) P 741
8. T. Nishino, etc. Phys. Rev. B 33, No. 3, Feb. (1986) P 2042
- ✓ 9. A. W. Kleinsasser, Phys. Rev. B 35, No. 16, June, (1987) P 8753
10. M. Hatano, etc. Appl. Phys. Lett. 53 (5), Aug. (1988), P 409.
11. T. Nishino, etc. IE³, ED-10, No. 2, Feb (1989) P 61
12. Z. Ivanov. etc. LT18, (1987) P 1617
13. A. W. Kleinsasser. etc. LT18, (1987) P 1545. 综述.
14. A. W. Kleinsasser, etc. IE³ Mag-23, No. 2, Mar. (1987) P 703
15. Z. Ivanov. etc. IE³, Mag-23, No. 2, Mar. (1987), P 711

题目的实验过程

一九八一年上半年主要是工艺练习。下半年做的第一批片子是 $2\mu\text{m}$ 宽的 Josephson 结。在~~在~~测量该结在合金^前后的 $I-V$ 线性度和电阻。结果发现正反向电阻都很大 ($1\text{M}\Omega$ 左右) 并且不对称。所以决定合金。换了几个条件。由于合金时间长会引起 Pb 与 GaAs 超导体层的氧化并侵入 GaAs 体内, 这样每便不是超导体层了。所以合金时间不能过长。温度也不能过高。(国际上这类器件制作时是不合金的) 我们将样品在 300°C 合金 45", 在 300K 与 77K 下测量, 发现结果都不如非线性还是很大。在 $J-I$ 晶体管图例上可以看见 $4-5\text{V}$ 的正反向击穿电压。这种样品在 4.2K 下测量未得到任何预期的结果。

实验中出现的^{问题}和^{问题}和^{问题}的结果让我们的反思:

1. 我们的现在的材料是 $n\text{-GaAs}/\text{AlGaAs}$ 异质结中 2DEG , 而 $n\text{-GaAs}$ 与 Si 层形成的 Schottky 势垒很高 0.7V , 合金时间是 $5'$ 450°C 。(对 AuGeNi) 我们注意到别人所做的工作都是在 p 型材料上做的。因为 p 型 Si 与 GaAs 材料势垒较低, Si 层在合金时易形成欧姆接触。所以我想改以前的 $n\text{-GaAs}/\text{AlGaAs}$ 结构为 $p\text{-GaAs}/\text{AlGaAs}$, 即采用 2DHG 。
2. GaAs 的势垒比 Si 为高。所以合金是困难的。所以应该先解决单结, 即 $\text{Metal}/\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ 的欧姆接触问题。这是一个侧向的欧姆接触问题, 要确定合金的合金条件。这个条件是个临界点, 他同时满足

中国科学院半导体研究所科研报告

共

页第

页

① 形成 M/S 且接触. 在低温超导体中系看作 superconductor 与 2DHG 的 隧穿非线性现象.

② 不能合金过长, 使 $Pb+2n$ 在 2DHG 中扩散过长, 或使 $Pb+2n$ 层过厚而变质 ($Pb+2n$ 不再是超导体层).

3. 国际上已有人做出用 2DHG 作为媒介的 JFET, 并发表得出了行家的论文. (by A.W. Kleinsasser, 在 IEEE MAG 上做过 Invited paper Review.) 他的工作是 1987 年 10 月发表的结果, 由于文献到来的时间延迟及我所未订 Low Temp. Conference 等有关事项, 我们直到 1988 年才看到此类文章. 而这时我们的工作已开展近一年了. 但单结的隧穿 (超导体/半导体) 的隧穿始于 1973. 由 M. McColl 等提出. 它是 Pb 和 $GaAs$ 形成的 S/Sn 结. 而超导体与 2DEG 或 2DHG 形成的超导体线致至今尚无人作论述. ~~另外, 这个问题有没有~~

4. 这个问题的意义所在.

① 应用在微波探测领域. 利用其高转变斜率的特点.

② 是 L. Giacver 的超导体/绝缘体通过 thin insulator 隧穿的延伸. 在我们这儿, thin insulator 主要是 Schottky 势垒. 金属则是 2DHG.