

金属-绝缘体-半导体(Au-SiO₂-Si) 隧道结的负阻现象与发光特性*

王茂祥 俞建华 孙承休

吴宗汉

(东南大学电子工程系, 南京 210096) (东南大学物理系, 南京 210096)

(1999 年 5 月 28 日收到)

制备了 Au-SiO₂-Si 结构 MIS 隧道发光结. 测试并分析了该结的发光特性及电流-电压 ($I-V$) 特性. 指出结的发光是由各膜层界面激发的表面等离极化激元 (Surface Plasmon Polariton, SPP) 与膜层表面粗糙度相互耦合的结果. 观察到 MIS 结 $I-V$ 特性中存在的负阻现象, 采用 SPP 对电子的束缚模型对这一现象进行了初步分析. 利用原子力显微镜 (AFM) 对结的表面形貌进行了观测, 由此讨论了 MIS 隧道结的发光与电子在结内的隧穿输运特性之间的内在关系.

PACC: 7340R

1 引 言

1976 年 Lambe 和 McCarthy^[1] 在测试 MIM (Metal-Insulator-Metal) 结的隧道谱时观察到该结的宽带发光现象. 这种发光效应与半导体 p-n 结的发光是完全不同的, 其发光频谱与所加偏压存在一高额量子截断关系 $h\nu = |eV_0|$, 其中 V_0 为所加偏压, e 为电子电荷, h 为普朗克常数. 由于 MIM 结具有平面薄膜结构, 制备工艺简单, 成本低廉, 发光电压较低, 发光颜色可变, 并且属于全固态器件, 引起了许多研究人员的极大兴趣. 随着集成光电子学的发展, 迫切需要开发适合于 VLSI 尺寸的 Si 基发光器件. 为此, 近几年来, 在 MIM 结研究的基础上开始了金属-绝缘层-半导体硅 (Metal-Insulator-Semiconductor, MIS) 结构的隧道发光结的研究^[2,3]. 这种 MIS 发光结能很好地与 Si 微电子集成工艺兼容, 与 Si 微电子芯片实现真正的光电单片集成, 从而克服了 III-V 族化合物半导体发光器件的不足, 有望在集成光电子学领域获得应用. MIS 结的发光过程与 MIM 结一样, 涉及到电子、光子、声子、等离激元、极化激元等各种固体无激发的产生及其在层状薄膜之间的相互耦合与转换关系. 本文采用掺杂、氧化、光刻等半导体工艺及真空镀膜技术成功地制备了 Au-SiO₂-Si 薄膜结构 MIS 隧道发光结. 对所制备的 MIS 结的发光特性及电流-电压 ($I-V$) 特性进行了测

试与分析. 观察到 $I-V$ 特性中负阻现象的存在, 采用电子束缚模型对这一现象进行了初步分析. 利用原子力显微镜 (AFM) 对结的表面形貌进行了观测, 并由此讨论了结的发光与电子在结内的隧穿输运特性之间的关系.

2 实 验

取晶向为 111 的 n 型 Si 片为基底制备 MIS 结, 经过严格清洗并通过高浓度 Sb 的体掺杂, 使硅基片电阻率低至 $(2-3) \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$, 然后使用硅烷热分解法在其光滑面淀积一层 60—80 nm 左右的 SiO₂. 在该层 SiO₂ 上光刻形成一个直径 3 mm 左右的小孔. 在小孔处用干氧热氧化法 (700—800°C) 生长一层厚度低于 10 nm 的薄层 SiO₂, 该层即为 MIS 结的绝缘层, 其周围的厚层 SiO₂ 主要用以减低结的漏电流. 然后采用真空蒸发镀膜制备一层厚 50 nm 左右的 Au 膜, 作为顶电极. 同样, 在基片背面蒸镀一层 Al 膜, 以用于引出底电极. 真空蒸发镀膜均在 D-300 高真空镀膜机上完成. 工作真空度 $(3-5) \times 10^{-3} \text{ Pa}$, 最后用低温银导电胶引出电极. 这样便形成了 Au-SiO₂-Si 薄膜结构的 MIS 隧道发光结. 结构如图 1 所示. 将制备好的 MIS 结加上直流偏压 (其中 Au 接正极, 背面 Al 膜接负极), 观察其发光特性. 采用 AFM 对结的表面形貌进行了观察测量, 采用型号为 GDI723 的双路直流稳

* 国家自然科学基金 (批准号: 59977002) 资助的课题.

压源作电源进行了 $I-V$ 特性的测试, 结果分别如图 3 图 4 所示.

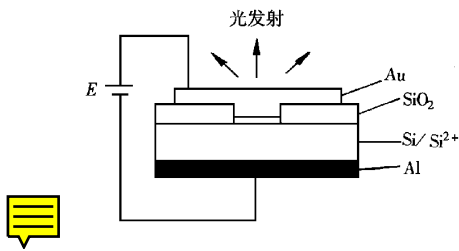


图 1 Au-SiO₂-Si 薄膜 MIS 隧道发光结的结构

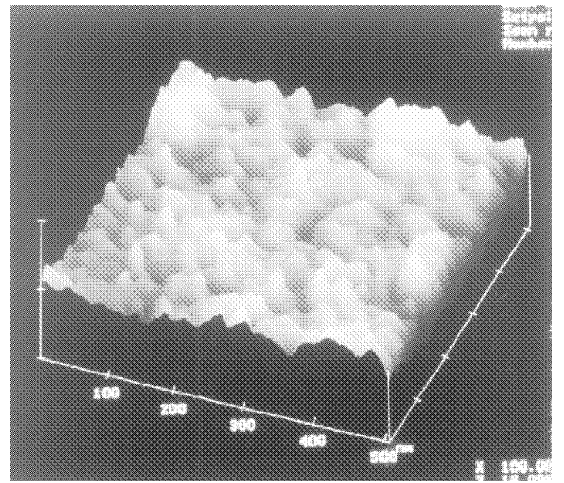


图 3 Au-SiO₂-Si 隧道结表面 AFM 形貌

3 结果与讨论

3.1 电子隧穿与发光特性

将制备好的 MIS(Au-SiO₂-Si) 结顶电极 Au 接正极, 背面底电极 Al 膜接负极, 由小到大缓缓加上直流偏压, 观察其发光特性, 发现在 3.2 V 左右结已开始发光, 颜色为红色, 随着电压的不断增大, 发光亮度也不断增强, 且颜色逐渐变淡. 电压达 12 V 左右时结面发光开始闪烁, 并伴有放电现象, 说明结已开始击穿. 由于 MIS 结在氧化层 SiO₂ 两侧加上电压 V 后, 造成一电势差, Si²⁺-Si 膜及 Au 膜的费米能级 E_{F1} 、 E_{F2} 分别得到提高和降低 (如图 2 示, 其中 ϕ_1 、 ϕ_2 分别为 Si、Au 的逸出功.) Si²⁺-Si 膜费米能级以下为电子所依据的能级与 Au 费米能级以上的空能级相对应, 通过隧道效应使电子得以隧穿 SiO₂ 而在界面上激发起表面等离极化电磁激元 (SPP).

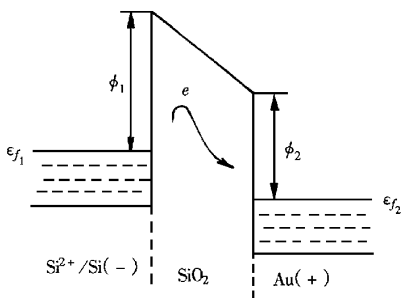


图 2 加偏压下的 Au-SiO₂-Si 隧道结势垒结构

从 SPP 的色散关系分析可以知道^[4,5], 其能量与动量不能同时守恒, 作为束缚态电磁波的 SPP 通过动量补偿可转变为自由光子发射出来. 动量(波矢)补偿最常用的方式是借助于粗糙度散射来完成, 从 MIS 结的 AFM 照片(图 3)可以看出, 结的表面存在一定

间隔的较为均匀的颗粒状分布, 两相邻的“颗粒”突起之间的距离称为自相关长度 a , 当 SPP 波矢 q_{SPP} 与自由光子波矢 k_c 满足

$$q_{SPP} = k_c + \frac{2n\pi}{a} \quad (k_c = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_0} \sin\theta),$$

式中 n 为整数, ω 为自由光子的角频率, ϵ_0 为空气的介电常数, θ 为光发射角. 此时 SPP 波矢得到粗糙度的补偿后满足动量守恒可形成光发射. 理论上的进一步处理为假定一表面粗糙度剖面函数 $\zeta(x)$, 它具有有一系列傅里叶系数的随机分布函数, 将它作为散射 SPP 的微扰, 从而将粗糙度转化为表面的附加电流进行发光特性的分析计算. 应该说, 膜层表面的随机不规则性即表面粗糙度, 可使 SPP 散射到其他能态, 或将储存在 SPP 中的能量耦合成向空间辐射的光子形成可见光的发射. 这个过程类似于半导体光电特性中的间接半导体的电子借助于声子的跃迁. 在 Au-SiO₂-Si 薄膜 MIS 隧道发光结中, 发光主要来自 Au-air 与 Au-SiO₂ 界面的 SPP 的散射, 其较 Si-SiO₂ 界面的 SPP 耦合所形成的光发射衰减要小, 因其离开结面距离较近. 当然, 随着偏压的不断增大, 场强不断增强, 场致发射所引起的电子数及热电子数将有所增加, 其对发光均匀性形成干扰, 最终导致结的击穿.

3.2 $I-V$ 特性与负阻现象

对 MIS(Au-SiO₂-Si) 结的 $I-V$ 特性进行了测试, 图 4(a)(b) 分别为两个 MIS 结的测量结果. 可以发现其存在较为明显的负阻区, 图 4(a) 曲线有两个负阻区, 即 1.2—1.5 V 与 3.2—3.5 V 区域. (b) 曲线主要有一个负阻区, 即 1.7—2.0 V 区域. 这一现象是很有趣的. 应该说, 结加上一定的电压后, 即使电压较低 (< 5

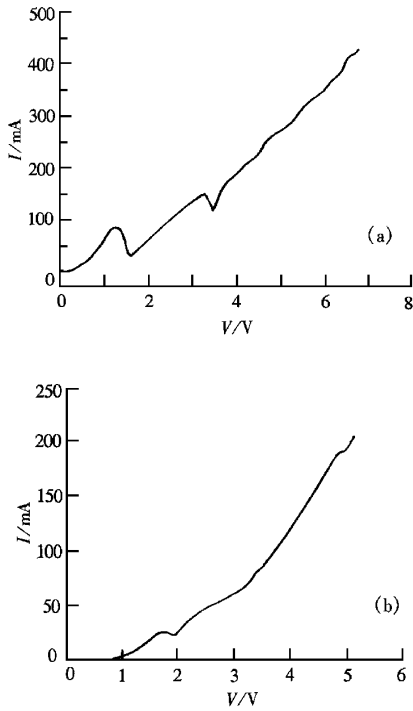


图 4 Au-SiO₂-Si 隧道结 I-V 特性

V),由于中间绝缘层较薄和电子波动性的存在,电子会通过隧道效应由 Si 隧穿 SiO₂ 到达顶电极 Au,由于隧穿电子的扰动,在金属(Si²⁺-Si)与介质的界面会耦合产生 SPP. SPP 波由界面向结内部穿透而衰减,衰减为原来 1/e 处的距离为穿透深度 δ. SPP 向结内的穿透,会对隧穿电子产生一定的阻挡作用.当结加上偏压后,刚开始时,结偏压较低,隧穿电子获得的能量较低,激发 SPP 的强度也较低,此时 SPP 对隧穿电子的阻挡作用也较小,因此,随偏压 V 增加,隧穿电子数即电流 I 将不断增加.当 V 达到某一值时,隧穿电子激发的 SPP 波较强,对隧穿电子的阻挡作用相应增加,大量电子束缚在结的界面,并且由于 SPP 波场的方向处于交变状态,这些束缚电子还将在结的上下界面处来回跃迁(其模型如图 5),这些都将使得电子的平均有效隧穿距离增加,单位时间到达正极 Au 的隧穿电子数大大降低,如果其降低数超过随电压增加而增加的隧穿电子数,将引起回路中电流的突然下降.这就产生了电流随电压增加的负跳变现象即负阻现象(Negative Resistance Phenomenon, NRP).而此后,随着 V 的继续上升,如果抵消掉 SPP 的阻挡作用后,隧穿 SiO₂ 电子数有净的增加,电流又将重新回升.由于电流的形成是这二者的综合效应,故 I-V 特性中可能存在若干负阻区.在我们实验中的两个 MIS 结的

较为明显的负阻区分别为 1.2—1.5 V, 3.2—3.5 V 区域及 1.7—2.0 V 区域.

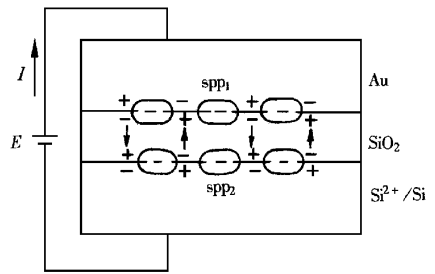


图 5 SPP 对 Au-SiO₂-Si 结隧穿电子的束缚模型

在大量的实验中,可以发现 I-V 特性中能产生 NRP 的结,一般总伴有发光现象产生,反之亦然,至于少数样品未见负阻现象也有较弱发光,是因为结的附加电阻如接触电阻 R₀、缺陷电阻 R₁、多晶结构的金属膜电阻 R(T)等⁶掩盖了负阻现象.这些均说明 NRP 的存在对结的发光特性有较大的影响,应该说, SPP 对电子的束缚反过来促使电子对界面 SPP 的进一步激发, SPP 波矢得到粗糙度的补偿后满足动量守恒可形成一宽带光发射.结表面粗糙度的存在有利于 SPP 对隧穿电子的束缚.结 I-V 特性中 NRP 的产生表明 MIS 结能有效地激发起 SPP 并对电子进行束缚, SPP 对电子的束缚又能更进一步使 SPP 激发增强,从而使 SPP 与粗糙度耦合后能形成良好的发光现象.因此,负阻现象与 SPP 的激发及 MIS 结的发光之间相互关联.

4 结 论

对 MIS(Au-SiO₂-Si)隧道结负阻现象与发光特性的研究,有助于认识隧道结发光过程中,电子、光子、SPP 及其他元激发之间的相互耦合转换关系,从而有利于更深入地揭示结的发光规律.分析表明 I-V 特性中的负阻现象与电子的隧穿特性,电子的隧穿与表面等离极化激元 SPP 的激发及 SPP 与发光特性之间是相互关联的,而 SPP 是产生负阻与形成发光的中介.

[1] J. Lambe, S. L. McCarthy, *Phys. Rev. Lett.*, **37**(1976), 923.
 [2] J. Watanabe, Y. Uehara, J. Murota et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **32**(1993), 99.
 [3] C. X. Sun, Y. W. Zhang, Z. L. Gao, *Chinese J. Electr.*, **5**(1996), 44.
 [4] J. F. Donohue, E. Y. Wang, *J. Appl. Phys.*, **62**(1987), 1313.

- [5] V. M. Agronovich ,D. L. Mills ,Surface Polaritons(North-Holland Publication ,1982) 3. (1998) ,300 [in Chinese] 俞建华、孙承休、王茂祥等 ,物理学报 , 47(1998) ,300]
- [6] J. H. Yu ,C. X. Sun ,M. X. Wang ,*Acta Physica Sinica* **47**

NEGATIVE RESISTANCE PHENOMENON AND LIGHT EMISSION PROPERTY OF THE METAL-INSULATOR-SEMICONDUCTOR (Au-SiO₂-Si) TUNNEL JUNCTION*

WANG MAO-XIANG YU JIAN-HUA SUN CHENG-XIU

(*Department of Electronic Engineering , Southeast University , Nanjing 210096 ,China*)

WU ZONG-HAN

(*Department of Physics , Southeast university , Nanjing 210096 ,China*)

(Received 28 May 1999)

ABSTRACT

The Au-SiO₂-Si thin film MIS(Metal-Insulator-Semiconductor) tunnel junction was fabricated. The light emission property and *I-V* characteristic of this junction were measured and analyzed. Result indicated that the light emission was due to the excitation of Surface Plasmon Polariton(SPP) and the couple of SPP with the surface roughness subsequently in the MIS system. We observed the negative resistance phenomenon(NRP) in the *I-V* curve of this MIS junction , which was explained by the electrons bonding model. We also got the AFM(atomic force microscopy) photo of the surface of MIS junction , by which the relation among the electrons tunneling , the excitation of SPP and the light emission of the MIS junction was discussed.

PACC : 7340R