

双势垒隧道发光结 I - V 特性中的负阻现象¹

王茂祥 吴宗汉* 孙承休 章继高**

(东南大学电子工程系 南京 210096)

*(东南大学物理系 南京 210096)

** (北京邮电大学 北京 100876)

摘要 制备了含两层绝缘层的双势垒结构隧道发光结,介绍了其结构特点,分析了电子在结中的共振隧穿特性.结合电子隧穿特性及结的发光机理,对结 I - V 特性中负阻现象的产生及其与表面等离极化激元激发发光的关系进行了研究.

关键词 双势垒结构,共振隧穿,负阻现象,表面等离极化激元

中图分类号 TN383

1 引言

1976 年 Lambe 和 McCarthy^[1] 首次观察到 MIM(Metal-Insulator-Metal) 结的宽带发光现象,结的基本结构为 Al-Al₂O₃-Ag 薄膜系统.该结具有平面薄膜结构,发光电压较低,发光颜色可变,可与集成工艺兼容,因此有着广泛的应用前景.为改善其发光特性,提高发光效率,许多学者从理论与实验两方面做了大量工作^[2,3].理论计算表明^[4],作为单绝缘层的普通 MIM 结,由于隧穿电子与内电磁场的相互作用较弱,电子隧穿激发表面等离极化激元及其转换为光子的效率都比较低,如果在 MIM 结的顶电极与底电极两层金属膜之间设置两层或两层以上的多层栅结构,绝缘层中会产生一些共振的分立能级,使电子在某些能量下有较高的隧穿几率,这将有利于提高电光转换的量子效率,从而提高结的发光强度等性能.为此,分别制备了含两层 Al₂O₃ 及 MgF₂ 与 Al₂O₃ 绝缘层的 Al-Al₂O₃-Al-Al₂O₃-Au 及 Cu-(Al)Al₂O₃-MgF₂-Au 结构隧道结,通过对结的电学性能的测试,发现其 I - V (电流-电压)特性存在明显的负阻现象,即电流随电压上升到一定值时,电压进一步增加时,电流会突然大幅度地下降.本文结合电子隧穿特性及结的发光机理,对负阻现象的产生及其与表面等离极化激元激发发光的关系进行了研究.

2 双势垒隧道结的制备与结构

结的制备通常以洁净的载玻片(约 2.5×7.5cm²)为基底,采用真空镀膜的方法(工作真空度 2~6×10⁻³Pa)进行,制备前要对载玻片按真空镀膜工艺进行清洗,对于 Al-Al₂O₃-Al-Al₂O₃-Au 结,其底电极 Al 膜厚约 80nm,顶电极 Au 厚约 50nm,与底电极接近的第一层 Al₂O₃ 厚约 3nm,而第二层 Al₂O₃ 厚 5nm 左右. Al₂O₃ 由 Al 膜通过一定时间的自然氧化而生成.通过对该结发光特性的测试,发现其发光亮度较同等电压下单势垒 MIM 结明显要强,但其发光仍存在着衰减过程.分析认为这是由于底电极 Al 膜在焦耳热下不断氧化引起的,为此,以稳定性较好的 Cu 代替 Al 作底电极,制备了 Cu-(Al)Al₂O₃-MgF₂-Au 双势垒结,使结的发光稳定性大大提高. Cu 膜厚约 80nm, Au 膜仍厚 50nm, Al₂O₃ 及 MgF₂ 分别厚约 3nm 与 5~8nm,分别由 Al 膜的自然氧化及真空蒸发得到.另外,在结的最底层都制备了一层厚约

¹ 1998-08-10 收到, 1999-05-04 定稿
国家自然科学基金资助课题 (69576006)

为 100nm 的 MgF_2 多孔层薄膜, 以使结存在一定的粗糙度, 这是因为结的发光过程首先是隧穿电子激发表面等离极化激元 (Surface Plasmon Polariton, SPP), SPP 是一种束缚态的电磁波, 只有在表面粗糙度等的散射下才能转变为自由态光子发射出来。Al- Al_2O_3 -Al- Al_2O_3 -Au 结的结构如图 1 所示, Cu-(Al) Al_2O_3 - MgF_2 -Au 结构与此类似, 只是膜系有所不同。它们共同的结构特点是在两层金属膜之间均含有两层绝缘膜, 从而有利于绝缘层中共振能级的形成。

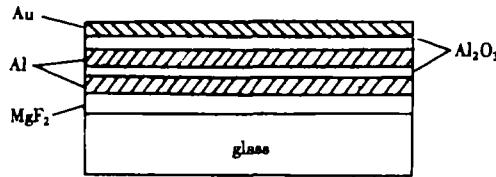


图 1 Al- Al_2O_3 -Al- Al_2O_3 -Au 隧道结的结构

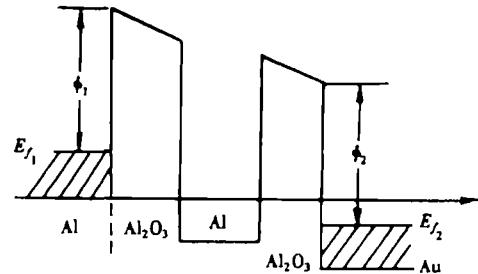


图 2 Al- Al_2O_3 -Al- Al_2O_3 -Au 隧道结势垒模型

3 双势垒隧道结的势垒模型

结制备时, 使第二栅较第一栅略厚, 由于厚度的差异及禁带宽度的不同, 根据量子力学效应, 第二栅中将有分立的能级存在。对 Al- Al_2O_3 -Al- Al_2O_3 -Au 结构隧道结, 其势垒模型可由图 2 表示 (Cu-(Al) Al_2O_3 - MgF_2 -Au 结与此相似)。 E_{f1} 、 E_{f2} 分别为 Al、 Au 的费米能级, ϕ_1 、 ϕ_2 分别为 Al、 Au 的功函数。由于第一栅 Al_2O_3 较薄, 隧穿该层的电子可看作是由底电极与该栅共同作为发射极发射的“热”电子, 其到达第二栅边界后将通过第二栅中的分立能级以共振隧穿的形式到达顶电极。此时第二栅对于这些电子的传输与电子能量呈非线性关系。分立能级的大小可近似表示为^[4]

$$E_n = \frac{1}{2m^*} \left(\frac{n\hbar}{2d_2} \right)^2 + \phi_2;$$

隧道电流由 Fowler-Nordheim 公式表示

$$I_f = \frac{e^3 A}{16\pi^2 \hbar (e\phi_B)} \left(\frac{m_{\parallel}}{m^*} \right) |E_{0x}|^2 \exp \left(-\frac{4(2m^*)^{1/2} (e\phi_B)^{3/2}}{3\hbar e |E_{0x}|} \right);$$

式中 ϕ_2 、 d_2 分别为第二栅的功函数及厚度, \hbar 为普朗克常数, A 为结面积, e 为电子电荷, m^* 为隧穿电子在第二栅中的有效质量, m_{\parallel} 为平行于结界面的电子有效质量, E_{0x} 为第二栅介质层中的电场强度, ϕ_B 为其势垒高度。在分立能级上电子的隧道电流也将较大。

4 负阻现象与发光特性

采用 HP4145B 型 Semiconductor Parameter Analyzer 测试仪, 对多层栅隧道结的电流-电压 ($I-V$) 特性进行了测试, 对于 Al- Al_2O_3 -Al- Al_2O_3 -Au 及 Cu-(Al) Al_2O_3 - MgF_2 -Au 结,

其典型 $I-V$ 特性分别如图 3, 图 4 所示 (测量均在室温下进行)。

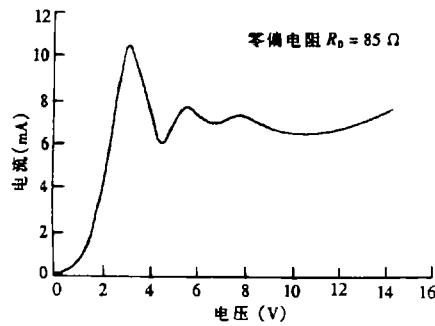
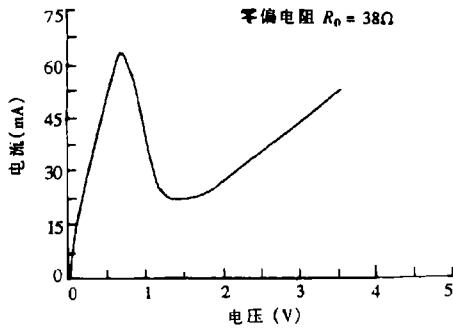


图 3 Al-Al₂O₃-Al-Al₂O₃-Au 隧道结 $I-V$ 特性

图 4 Cu-(Al)Al₂O₃-MgF₂-Au 结 $I-V$ 特性

对于 Al-Al₂O₃-Al-Al₂O₃-Au, 可以看到电压在 0-0.6V 范围内, 电流随电压近似成线性关系快速上升, 而当电压达到某一临界值 0.6V 左右时, 随着电压的继续增加, 电流会突大幅度下降, 在很小的 ΔV 之内, 电流的负跳变较为显著, 这就产生了所谓的负阻现象 (Negative Resistance Phenomenon, NRP), 这一现象对结的发光特性有较大的影响, 对于 Cu-(Al)Al₂O₃-MgF₂-Au 结, 负阻区主要位于 3.0-4.0V 之间, 其负阻现象也较明显, 与 Al-Al₂O₃-Al-Al₂O₃-Au 结相比, 由于其第二栅 MgF₂ 与 Al₂O₃ 结构的差异性, 在加上一定的工作偏压后, 其能级的分裂情况如最低能级值, 能隙等会有所不同, 因而负阻产生时的阈值大小及电流负跳变的程度均有所不同。通常 $I-V$ 特性中能产生负阻的结, 一般总伴有发光现象产生, 反之亦然, 说明负阻与发光存在着一定的联系。双势垒隧道结中存在着电子的共振隧穿, 当电子通过共振能级隧穿时, 其由底电极向顶电极运动的透射系数较大, 电流密度随之也会增加, 当隧穿电子获得的能量满足激发 SPP 所需的最低阈值, 且与某一分立能级值相对应时, SPP 波被激发出来并对隧穿电子产生束缚作用, 使大量隧穿电子束缚于结中, 不能在回路中流动, 从而形成负阻现象。与单势垒 MIM 结相比, 由于双势垒结共振隧穿时电子运输系数较高, 在电压达到激发 SPP 波的阈值时, 引起的 SPP 振荡要更强, 因而束缚电子的能力也更强, 导致电流下降的幅度即负阻现象更强烈。而后, 随着电压的继续上升, 隧穿电子数密度会继续增加, 用于维系 SPP 激发并束缚于界面的电子数变化不大, 因此, 回路中流动的净电子数将不断增加, 电流又重新回升。SPP 波形成以后, 将与表面粗糙度耦合成自由光子。形成光发射, 对于 Al-Al₂O₃-Al-Al₂O₃-Au 结, 测得其光谱如图 5 所示, 谱峰位于 460nm 左右, 较单栅 MIM 结的谱峰 630nm, 700nm 有一明显的蓝移^[5], 说明双势垒结中 SPP 振荡确实更强, 耦合发光的频率更高。应该说, 发光过程及负阻的产生均与 SPP 波相关联。

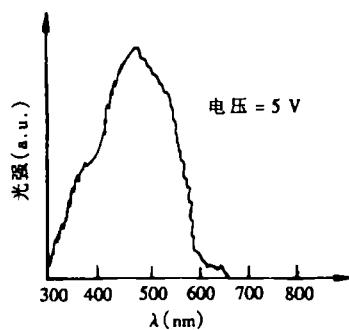


图 5 Al-Al₂O₃-Al-Al₂O₃-Au 隧道结发光光谱

5 结束语

对双势垒隧道发光结负阻现象的研究, 可以帮助我们更清楚地理解隧穿电子在多层栅隧道结中的运动过程, 揭示其电光转换机制, 了解电子隧穿激发 SPP 耦合发光的规律, 认识隧道结发光过程中, 电子、光子、声子、SPP 及其它元激发之间的相互关系。

参 考 文 献

- [1] lambe J, McCarthy S L. Light emission from inelastic electron tunneling. *Phys. Rev. Lett.*, 1976, 37(4): 923-925.
- [2] Ushioda S, Uehara Y, Takada M, *et al.* Grating-coupled light emission from the slow mode of metal-insulator-metal tunnel junction. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1992, 31(7): 870-873.
- [3] Donohue J F, Wang E Y. Surface plasmon dispersion analysis in the metal-oxide-metal tunnel diode. *J. Appl. Phys.*, 1987, 62(4): 1313-1317.
- [4] Sentirmay Z, *Prog. Quant. Electron.*, 1991, 15(2): 175-230.
- [5] 张佑文. MIM 隧道发光结的研究: [硕士论文]. 南京: 东南大学, 1997.

THE NEGATIVE RESISTANCE PHENOMENON IN THE I - V CURVE WITH DOUBLE BARRIER LIGHT EMISSION TUNNEL JUNCTIONS

Wang Maoxiang Wu Zonghan* Sun Chengxiu Zhang Jigao**

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

(**Department of Physics, Southeast University, Nanjing 210096*)

**(*Beijing University of Post and Telecommunication, Beijing 100876*)

Abstract The double-barrier light emission tunnel junctions have been fabricated. The characteristics of electronic resonant tunneling with the junctions have been analyzed. In connection with the electronic resonant tunneling and light emission mechanism of the junction, the negative resistance phenomenon (NRP) in the I - V curve and the relation between NRP and Surface Plasmon Polariton(SPP) have been studied especially.

Key words Double-barrier junction, Electronic resonant tunneling, Negative resistance phenomenon, Surface Plasmon Polariton(SPP)

王茂祥: 男, 1967 年生, 博士生, 目前主要从事光电子学及红外技术方面的研究工作.

吴宗汉: 男, 1939 年生, 教授, 目前主要从事材料物性及生物物理方面的研究工作.

孙承休: 男, 1937 年生, 教授, 目前主要从事光电子学方面的研究工作.

章继高: 男, 1934 年生, 教授, 博士生导师, 目前主要从事通信与电接触方面的研究工作.