

文章编号: 0253-2239(2002)10-1275-04

硅基双势垒金属-绝缘层-金属-绝缘层-半导体 隧道发光结*

唐洁影 刘柯林 聂丽程

(东南大学电子工程系微电子机械系统教育部重点实验室, 南京 210096)

摘要: 讨论了硅基双势垒金属-绝缘层-金属-绝缘层-半导体(MIMIS)隧道发光结的结构、制备方法及发光特性。所制备的样品最大发光亮度达到 1.9 cd/m^2 、光谱的峰值波长移到了蓝绿光区,表明双势垒 MIMIS 隧道发光结的性能优于单势垒金属-绝缘层-半导体(MIS)隧道发光结。利用量子力学的共振隧穿效应对它作了较好的解释。

关键词: 金属-绝缘层-金属-绝缘层-半导体; 双势垒; 发光特性; 共振隧穿

中图分类号: O482.31; TN383+.1 文献标识码: A

1 引 言

硅基隧道发光结的基本结构为金属-绝缘层-半导体(MIS)系统,当外加偏压后,电子隧穿绝缘层势垒,隧穿电子将对界面附近金属中的电子气产生扰动导致等离电磁振荡,产生表面等离体子,另一方面,界面附近绝缘层中的原子在隧穿电子的影响下,导致晶格的极化电磁振荡,产生表面电磁耦(合波)子。在金属、绝缘层界面,两种振荡相互耦合,形成表面等离电磁耦子。它是被束缚在界面上的,由它产生的横电磁波是沿结平面方向传播的,由麦克斯韦方程及边界条件,可得到不同界面处表面等离电磁耦子的频率^[1]。

表面等离电磁耦子波的波矢比同频率下介质中传播的光子的波矢大,无法直接转变成光子发射出来。必须经过一定的波矢补偿,才能同时满足动量和能量守恒,使表面等离电磁耦子波转变成辐射光子。在金属-绝缘层-半导体(简称 MIS)结构中引入一定粗糙度可实现这种波矢补偿。在我们的制备工艺中,通过 HF 酸腐蚀发光区,以得到所需的界面粗糙度。

MIS 隧道发光器件无论是在器件结构还是工作原理上与以前的发光器件有本质的不同,它具有平面薄膜结构、发光电压较低、发光颜色可变、成本低廉、可发射蓝绿光等特点,因而在平面彩色显示、集成光学、光电通信等领域有着广阔的应用前景。

自 1976 年 Lambe 和 MacCarthy^[2]在研究中首先发现金属-绝缘层-金属隧道结的发光现象以来,国内外许多学者从理论上和实验上对之进行了深入的研究^[3-9]。但是,目前国内外对硅基隧道发光结的研究离实用化还有一定的距离,主要问题是发光强度较弱,尤其是蓝绿光相对于红、黄光更弱。为此,我们对 MIS 结的结构进行了改进与优化,采用双绝缘层金属-绝缘层-金属-绝缘层-半导体(简称 MIMIS)结构代替单绝缘层 MIS 结构,提高了发光效率,特别是蓝绿光得到了明显增强。

2 硅基双势垒隧道发光结的结构与制备

硅基双势垒隧道发光结为 MIMIS 结构,图 1 给出其结构示意图。

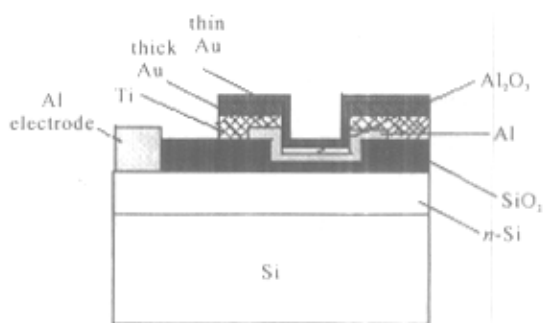


Fig. 1 Structure of the double barrier MIMIS tunneling junction

以 n 型 Si 单晶为衬底,掺杂浓度为 10^{21} cm^{-3} 。通过 $920 \text{ }^\circ\text{C}$ 干氧氧化在 Si 表面形成 200 nm 厚的 SiO_2 。在厚 SiO_2 上光刻出一定图形的发光区,再氧化形成一层薄 SiO_2 作为 MIMIS 结的第一绝缘层

* 国家自然科学基金(69576006)、东南大学科学基金(9206001084)资助课题。

E-mail: fjzeng@jlonline.com

收稿日期 2001-06-29; 收到修改稿日期 2001-11-08

(厚度选择 3 nm、4 nm、5 nm 几个参量)。在厚 SiO_2 上光刻出电极孔,蒸上 Al 作为负电极的引线压焊区。在发光区的薄 SiO_2 上蒸一层厚为 15 nm 左右的 Al 作为中间金属层,Al 自然氧化 48 h,形成厚 3 nm 左右的 Al_2O_3 作为第二绝缘层。然后在样品表面蒸厚为 10 nm 左右的 Ti 及厚为 500 nm 左右的厚 Au,并刻去和腐蚀掉遮挡在 Al 电极和发光区域上的厚 Au 及 Ti 层,厚 Au 膜作为阳极引线压焊区, Ti 作为 Au 与 SiO_2 之间的粘联层,增加 Au 对 SiO_2 的附着力。最后蒸一层 50 nm 左右的薄 Au 膜覆盖在发光区的 Al_2O_3 层上,且与分布在发光区外围的厚 Au 膜重合接触,作为 MIMIS 结的阳极。

3 发光特性测试

为了验证双绝缘层 MIMIS 结构的发光性能优于单绝缘层 MIS 结构,我们对 MIMIS 样品的发光亮度及发光光谱分别进行了测试,并且与以前制备的 MIS 样品的测试结果^[10]进行了比较。制备 MIMIS 样品时,我们使用了三块 3 英寸的 Si 片,对第一绝缘层 SiO_2 的厚度设计了 3 nm、4 nm 和 5 nm 三种参量,分别在三块 Si 片上实现。测试中,将样品按所属硅片分为 A、B、C 三类(即对应的薄 SiO_2 厚度分别为 3 nm、4 nm、5 nm),每一类样品有若干个,按阿拉伯数字 1 2 3...编号。

1) 发光亮度 采用 UBD1/4 型亮度计(Photo Research Division of Kollmorgen. cop),校准系数为 3.01,分别对三个 C 类 MIMIS 器件的光亮度进行了测量,测量结果如表 1 所示,表中同时给出了单势垒 MIS 器件(5[#])的测试结果。

Table 1. Light-emission intensity of the samples

sample	number	applied voltage /V	light-emission intensity (cd/m^2)
MIMIS	C2	11.6	0.10
	C1	14.0	1.90
	C3	12.1	1.15
MIS	MIS 5 [#]	5.2	0.02

MIS 5[#] 样品为单势垒结构,其工作电压较低,仅 5.2 V,而 MIMIS 器件为双势垒结构,能够承受的外加偏压较高,达到十几伏。然而,C2、C1 和 C3 三个 MIMIS 样品来自同一块大 Si 片的不同位置,由于实验条件的限制,其结构参量也会存在一定差异,因此它们的工作电压也不尽相同。但是,从表 1 中看出,任何一个 MIMIS 样品的发光亮度都比

MIS 样品的发光亮度有了较大提高,表中 MIMIS 样品的最大发光亮度达到了 $1.9 \text{ cd}/\text{m}^2$ 。

2) 发光光谱

利用日本 Shimadzu 公司制造的 RF-5000 光谱仪对多个 MIMIS 样品的发光光谱进行了测量,图 2(a)图 2(b)给出了两个 MIMIS 样品 B4、C2 的发光光谱。两样品的薄 SiO_2 厚度分别为 4 nm 和 5 nm 左右。

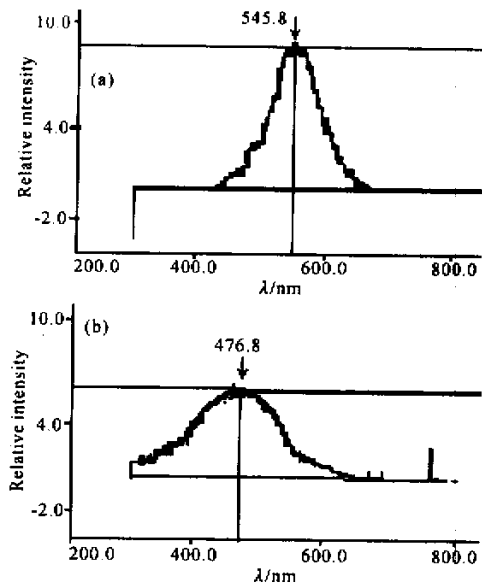


Fig.2 Luminescence spectra of the MIMIS samples. (a) Sample B4 ($V=7 \text{ V}$); (b) Sample C2 ($V=11.6 \text{ V}$)

从图 2 中看出,B4 样品的谱峰在 545nm 附近,属绿光区,而 C2 样品的谱峰在 480 nm 附近,属蓝光区。这可能是因为薄 SiO_2 厚度的不同,使器件工作电压不同,从而结中隧穿电子可获得的能量不同,相应的光谱峰值波长也就不同。

为了便于比较,图 3 给出了 MIS 单势垒隧道发光结典型的发光光谱曲线(光谱仪型号: SPEX 1403),主峰在 630 nm 附近。

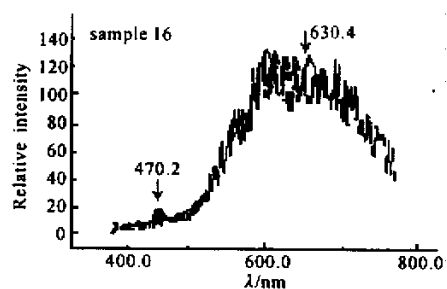


Fig.3 Luminescence spectrum of MIS sample 16 ($V=6.5 \text{ V}$)
显然,双势垒 MIMIS 隧道结的发光光谱中,蓝

绿光成份大大增加。

4 发光特性讨论

由发光特性测试结果可以看出,双势垒 MIMIS 结较单势垒 MIS 结发光亮度大为提高,发光光谱的谱峰也向短波长(蓝光波长)方向移动,说明双势垒结构的引入,使硅基隧道发光结的性能得以改善。图 4 给出了 MIMIS 结的结构简图,为了便于分析双势垒 MIMIS 结构光增强的机制,图 5 给出了与图

4 所示结构相应的势垒结构模型。

vacuum		ϵ_0
M ₂	top electrode	ϵ_1
I ₂	insulating layer	ϵ_2
M ₁	metal layer	ϵ_3
I ₁	insulating layer	ϵ_4
S	semiconductor	ϵ_5

Fig. 4 Schematic diagram of MIMIS sample

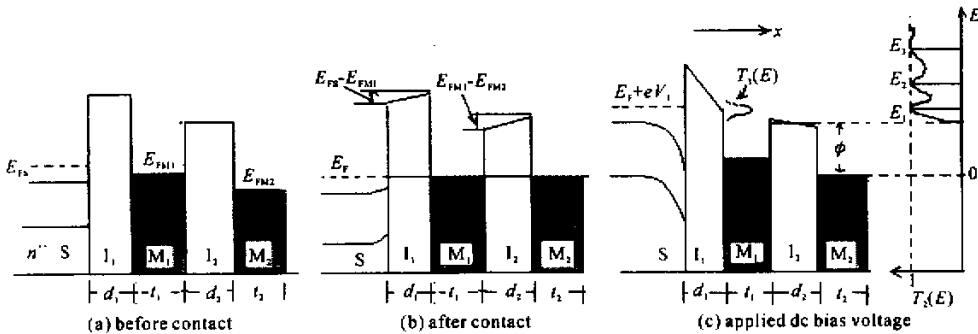


Fig. 5 The potential barrier model of MIMIS sample

若图 5 所示系统外加直流偏压为 V (S 端接负) 在绝缘层 I_1 、 I_2 两端的压降分别为 V_1 、 V_2 , 那么, 系统在外加直流偏置下, S 区中的电子获得一定的附加能量后成为 $E_F + eV_1$ (E_F 为费米能量), 这样的电子沿 x 轴正方向运动, 因绝缘层 I_1 很薄, 将有部分电子通过热电子发射和隧道贯穿到达 M_1 区, 透射电子强度相关能量的分布 $T_1(E)$ 在图 5(c) 中标出。设薄金属层 M_1 为半透明, 通过 M_1 的电子将与第二绝缘层作用, 其结果可通过解定态薛定谔方程得到。根据量子力学理论, 对 I_2 区域, 当入射电子能量小于势垒高度时, 定态薛定谔方程的解为指数衰减形式, 但入射电子能量若大于势垒高度时, 定态薛定谔方程的解应为振荡解形式。

现假设 $E_F + eV_1 > \phi$, 则 M_1 、 I_2 和 M_2 和三个区域定态薛定谔方程的解^[11]可表示为

$$\left. \begin{aligned} \psi_{M_1} &= A_1 \exp(ikx) + A_2 \exp(-ikx), \\ \psi_{I_2} &= B_1 \exp(i\beta x) + B_2 \exp(-i\beta x), \\ \psi_{M_2} &= C_1 \exp(iax), \end{aligned} \right\} (1)$$

其中,

$$k = \frac{2m_1^*(E - eV_2)}{\hbar^2},$$

$$\beta = \frac{2m_2^*(E - \phi)}{\hbar^2},$$

$$\alpha = \frac{2m_3^*E}{\hbar^2},$$

m_1^* 、 m_2^* 、 m_3^* 分别表示 M_1 区、 I_2 区和 M_2 区中电子的有效质量, E 为电子的能量。

按照几率流密度公式

$$J = \frac{-i\hbar}{m^*} \left(\psi^* \frac{\partial}{\partial x} \psi - \psi \frac{\partial}{\partial x} \psi^* \right),$$

可求出电子的入射、反射和透射密度 J_{in} 、 J_{ref} 和 J_{tr} , 为简单起见, 假设 $eV_2 \ll E$, 有 $\alpha \approx k$, 那么透射系数

$$T = \left| \frac{J_{tr}}{J_{in}} \right|^2 = \frac{4\beta^2 k^2}{(k^2 - \beta^2) \sin^2 \beta d_2 + 4\beta^2 k^2}, \quad (2)$$

显然, 当 $\beta d_2 = n\pi$ 时, T 值达到最大, 近似为 1。这种现象称为电子的隧穿共振。相应的电子能量呈分立状态, 其值为

$$E_n = \frac{\hbar^2 \beta^2}{2m_2^*} + \phi = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m_2^* d_2^2} n^2 + \phi, \quad (3)$$

这里将第二势垒的高度近似用它的平均值 ϕ 代替, n 为整数。式中 $E - \phi$ 代表电子的动能, 也可表示为

$$E - \phi = \frac{p^2}{2m_2^*} = \frac{\hbar^2 \beta^2}{2m_2^*}, \quad (4)$$

所以 $\beta = p/\hbar = 2\pi/\lambda$, p 为电子动量, λ 为德布罗意波长, 于是共振透射条件 $\beta d_2 = n\pi$ 可写为 $2d_2 = n\lambda$, 表明在第二势垒区中来回反射的电子波在到达右沿 (I_2/M_2 界面) 时, 都具有相同的相位, 从而使透射波具

有最大的强度。

据上分析表明,引入第二绝缘层后,只要满足一定的条件,系统中的电子由于隧穿共振效应而透射几率较大,能量发生分裂。透射强度关于能量的分布 $T_2(E)$ 示于图 5(c) 中。显然,系统中出现了单势垒所不具备的透射率较大的高能量电子能级[单势垒的透射电子强度相关能量的分布 $T_1(E)$ 见图 5(c)]。这些能级上的电子经过系统各界面层时,能够激发起高频的表面等离电磁耦子,这就是双势垒隧道结与单势垒隧道结相比,发射光谱中蓝绿光增强的原因。比较 $T_1(E)$ 、 $T_2(E)$ 分布曲线,双势垒系统中隧穿电子的能量范围较单势垒系统大得多,因此激发表面等离电磁耦子的效率得到提高。同时,第二绝缘层的引入,又使系统中金属-绝缘层界面增多,相应的表面等离电磁耦子模式也会增加,当然电子激发表面等离电磁耦子的效率也随之增加,发光亮度将得以提高。

结论 1) 双势垒 MIMIS 隧道结的光谱特性优于单势垒 MIS 隧道结,它的发光亮度大为提高,较单势垒结提高了数十倍,且发光光谱的峰值波长向短波方向移动,位于蓝绿光区。这使隧道发光结的研究更具有应用前景。

2) 应用量子力学隧穿共振理论分析双势垒 MIMIS 隧道结的势垒模型,表明在一定条件下,双势垒结构中存在分立的电子共振能级,增加了高能量的隧穿电子。所以,通过适当选择各层膜的参量可以很好地利用隧穿共振效应,提高隧道发光结的发光效率,改善光谱特性。

参 考 文 献

[1] 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

[2] Lamb J, McMarthy S L. Light emission from inelastic electron tunneling. *Phys. Rev. Lett.*, 1976, **37**(14):923~925

[3] Kirtley J, Thesis T N, Tsang J C. Light emission from tunnel junctions on gratings. *Phys. Rev. (B)*, 1981, **24**(10):5650~5663

[4] Soole J B D, Hughes H P. Roughness-coupled light emission from tunnel junction: The role of the fast surface plasmon. *Surf. Science*, 1988, **197**(2):250~266

[5] Znamensky D A, Yusupov R G, Mislavsky B V. Langmuir-Blodgett mono- and multilayers of fluorocarbon amphiphilic polymers and application in photogalvanic metal-insulator-semiconductor structure. *Thin Solid Films*, 1992, **219**(1~2):215~220

[6] Sun Chengxiu, Zhang Youwen, Gao Zhonglin. Some improvement on the light emission properties of MIM tunneling junction system. *Chinese J. Electronics*, 1996, **5**(1):44~48

[7] Zhang Y W, Sun C X. Relation of roughness and emitting spectrum of metal/insulator/metal tunnel junction. *Acta Electronica Sinica* (电子学报), 1997, **25**(5):25~28 (in Chinese)

[8] Yu J H, Sun C X. Electron tunneling and negative differential resistance of MIM light-emission tunnel junction. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 1998, **47**(2):300~306 (in Chinese)

[9] Wang M X, Sun C X. Research of electron resonant tunneling and light emission properties of double-barrier tunnel junction. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 1999, **48**(2):326~331

[10] Yu Jianhua. *The Research of the Light Emission Performance and the Current-Voltage Characteristic of Si-Based MIS Tunnel Diode* (硅基 MIS 隧道发光二极管的发光性能和电流-电压特性研究). [doctorial Dissertation], Nanjing: Southeast University, 1999, 52, 54 (in Chinese)

[11] Hui Hexing. *Quantum Mechanics* (量子力学). Beijing: Beijing University of Science and Engineering Press, 1995. 64~72 (in Chinese)

The Si-Based Double Barrier Tunneling Light Emitting Junction

Tang Jieying Liu Kelin Nie Licheng

(Key Laboratory of Micro-Electro-Mechanical-Systems of Education Ministry of China, Department of Electronic Engineering, Southeast University, Nanjing 210096)

(Received 29 June 2001; revised 8 November 2001)

Abstract: The structure, fabrication technology and light-emission properties of double barrier MIMIS tunneling junction are discussed. It shows better characteristics in comparison with MIS junction. The maximal luminance of the MIMIS devices is 1.9 cd/m^2 , and their spectrum peak appears in the blue area. The phenomena can be well explained according to resonant tunneling theory.

Key words: metal-insulator-metal-insulator-semiconductor (MIMIS); double barrier; light-emitting characteristics; resonant tunneling