

# MIS (Au-SiO<sub>2</sub>-Si) 隧道发光结

蔡益民 孙承杰 高中林

(东南大学电子工程系 南京 210096)

**摘要** 在研究一般 MIM (Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Au) 结的基础上,为了克服 Al 的不稳定性和改善结的性能,我们采用半导体材料 Si 代替 Al,研制成功 MIS (Au-SiO<sub>2</sub>-Si) 隧道结,观察到了稳定的发光现象. 介绍了 MIS 结的基本结构和工艺流程,分析了结中 SPP 的各个模式,讨论了结的发光光谱,阐明了 MIS 结的发光机理.

PACC: 7340R

## 1 引言

自从 1976 年 Lambe 和 McCarthy<sup>[1]</sup>首先发现金属-绝缘层-金属(MIM)隧道发光结的发光现象以来,由于 MIM 结作为一种新型光电器件,具有平面薄膜结构,外加低直流偏压,发光颜色可变、与集成工艺兼容、工艺简单、成本低廉等特点,许多学者从理论和实验两方面进行了深入的研究<sup>[2~5]</sup>.

一般 MIM 结的结构为 Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Au(见图 1 所示),基本工艺流程为:首先利用真空镀膜工艺,在洁净的玻片表面蒸一 Al 条,厚约 100nm,然后使其在空气中氧化,自然生成约 3nm 厚的自然氧化层,接着为了防止边缘击穿,在 Al 条两边蒸一层 MgF<sub>2</sub>. 最后在垂直 Al 条方向蒸厚约 40nm 的 Au 条,这样就形成一个 Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Au 隧道结,在 Au(正)与 Al(负)间加约 3~5 伏的低直流偏压,在结表面就发出可见光.

MIM 结的发光机理为一个二步过程:(1) 结加偏压后,电子隧穿氧化层势垒,在结界面处产生表面等离子体极化激元(Surface Plasmon Polariton,以下简称 SPP),  
(2) SPP 在一定条件下耦合发射出光子. 在一般 MIM 结中 SPP 与随机表面粗糙度耦合发光,Ushioda<sup>[3]</sup>采用棱镜将 SPP 耦合成光子,蔡益民等<sup>[6]</sup>采用声表面波与 SPP 耦合,而 Kirfley<sup>[4]</sup>则采用光栅耦合.

一般 MIM 结(Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Au)发光在室温下很不稳定,且较易失效. 主要有以下几个因素:

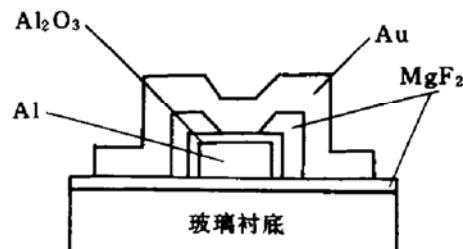


图 1 MIM 结结构

蔡益民 男,1969 年生,现在香港科技大学攻读工业工程专业第二博士学位

孙承杰 本文联系人,江苏省南京市东南大学电子工程系 602 教研组

1995 年 8 月 25 日收到初稿,1996 年 1 月 10 日收到修改稿

- (1) Al 在焦耳热作用下进一步氧化, 导致结的损坏.
- (2) SPP 与表面粗糙度耦合, 具有很强的随机性.
- (3)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  为自然氧化所得, 其结构疏松, 且质量较差.

为此, 我们采用半导体材料 Si 代替 Al,  $\text{SiO}_2$  代替  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 研制 MIS(Au-SiO<sub>2</sub>-Si)隧道结, 在 Au(正)与 Si 之间加直流偏压, 观察到稳定的发光现象, 且发光光谱中含蓝, 绿光成份.

J. Watanabe<sup>[7]</sup>也进行了 MIS 结研究, 他们主要通过 MIS 能带分析, 隧道电流测试来分析 MIS 结发光原理, 我们则通过分析 MIS 结中 SPP 各个模式, 结合发光光谱测试来阐明其发光机理.

与 MIM 结相比, MIS 结可利用成熟的 Si 集成制造工艺, 由于 Si,  $\text{SiO}_2$  的性能较 Al,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  稳定, 致密性好, 所以 MIS 结比 MIM 结耐压高, 稳定性好, 且能更好地与半导体集成工艺兼容.

## 2 MIS 结工艺

MIS 结工艺流程见图 2 所示:

- (1) 选衬底. 选掺杂浓度为  $6.3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  的 n 型(100)硅.
- (2) 清洗. 首先用清洗液( $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 = 3 \sim 4 : 1$ )清洗表面, 然后用 1%HF 除去自然氧化层.

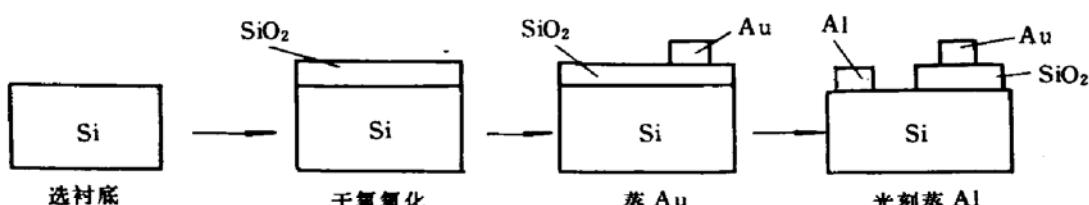


图 2 MIS 结构工艺流程图

- (3) 氧化. 800°C 干氧氧化 1 小时生成  $\text{SiO}_2$  层.
- (4) 蒸边界  $\text{MgF}_2$ .
- (5) 蒸顶电极 Au.
- (6) 光刻  $\text{SiO}_2$  层, 蒸底电极 Al 与衬底 Si 形成欧姆接触.

(7) 用低温银导电胶引出电极.

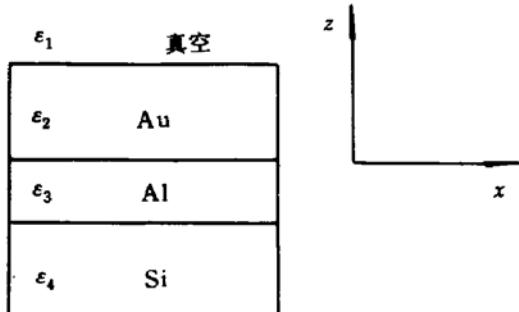


图 3 MIS 结结构图

## 3 MIS 结中 SPP 模式

MIS 结结构见图 3 所示,  $\epsilon_i, d_i, E_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) 分别为各层的介电常数, 厚度和电场强度.

设  $\vec{H}_x = \vec{H}_z = \vec{E}_y = 0$ , 则各区电场强度可表达为<sup>[8]</sup>:

$$\vec{E}_1 = B_1 [(ik_1/k)\vec{x} + \vec{z}] e^{-k_1 z} \quad (1)$$

$$\vec{E}_2 = (A_2 \vec{x} + B_2 \vec{z}) (e^{-k_2 z} + r_2 e^{k_2 z}) \quad (2)$$

$$\vec{E}_3 = (A_3 \vec{x} + B_3 \vec{z}) (e^{k_3 z} + r_3 e^{-k_3 z}) \quad (3)$$

$$\vec{E}_4 = B_4 [(-ik_4/k) \vec{x} + \vec{z}] e^{k_4 z} \quad (4)$$

其中  $A_i, B_i, r_i$  为系数,  $k$  为波矢,  $k_i = [k^2 - (\omega/c)^2 \epsilon_i]^{1/2}$  为衰减常数 ( $i=1, 2, 3, 4$ ).

由 Maxwell 方程及边界条件得:

$$\frac{k_3 \epsilon_2}{k_2 \epsilon_3} + \left( \frac{k_3 \epsilon_4 + k_4 \epsilon_3 \tanh k_3 d_3}{k_4 \epsilon_3 + k_3 \epsilon_4 \tanh k_3 d_4} \right) \times \left( \frac{k_1 \epsilon_2 + k_2 \tanh k_2 d_2}{k_2 + k_1 \epsilon_2 \tanh k_2 d_2} \right) = 0 \quad (5)$$

式(5)即为 SPP 色散曲线.

讨论:

(1) 当  $k \rightarrow 0$  时,  $\omega = 0$ .

(2) 当  $k \rightarrow \infty$  时,  $(\epsilon_2/\epsilon_3 + 1)(\epsilon_3 + \epsilon_4)(\epsilon_2 + 1) = 0$

解得:

- i)  $\epsilon_2 = -1$ , 即  $\omega = \omega_2 / \sqrt{2}$
- ii)  $\epsilon_2 = -\epsilon_3$ , 即  $\omega = \omega_2 / \sqrt{1 + \epsilon_3}$
- iii)  $\epsilon_4 = -\epsilon_3$ , 即  $\omega = \omega_4 / \sqrt{1 + \epsilon_3}$

其中  $\omega_2, \omega_4$  为 Au 与 Si 的等离子体振荡频率. 上述 i), ii), iii) 解分别对应于 Au/Vacuum, Au/SiO<sub>2</sub>, 和 Si/SiO<sub>2</sub> 三界面的 SPP 模式, 分别称之为 SPP 快模、SPP 慢模和 SPP 中间模. 每个解所对应的频率为该 SPP 模式的渐近频率.

金属的等离子振荡频率为:

$$\omega_p = \left( \frac{ne^2}{m^* \epsilon_0} \right)^{1/2} \quad (6)$$

式中  $n$  为电子浓度;  $e$  为电子电荷;  $m^*$  为电子有效质量.

衬底 Si 为 n 型, 电子浓度  $n = 6.3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ , 可近似用金属公式来求其等离子振荡频率  $\omega_p$ , 当  $n = 6.3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  时,  $m^* = 0.26 m_0$ <sup>[9]</sup>. 将数据代入公式(6)中得:

$$\omega_p = 5.52 \text{ eV}$$

已知金的等离子振荡频率为  $\omega_2 = 3.42 \text{ eV}$ ,  $\epsilon_3 = 3.8$ <sup>[10]</sup>, 则 MIS 结中 SPP 三模式色散曲线如图 4 所示. 各模式渐近频率为:

(1) 快模为  $\omega_2 / \sqrt{2} = 2.42 \text{ eV}$

(2) 慢模为  $\omega_2 / \sqrt{1 + \epsilon_3} = 1.57 \text{ eV}$

(3) 中间模为  $\omega_4 / \sqrt{1 + \epsilon_3} = 2.52 \text{ eV}$

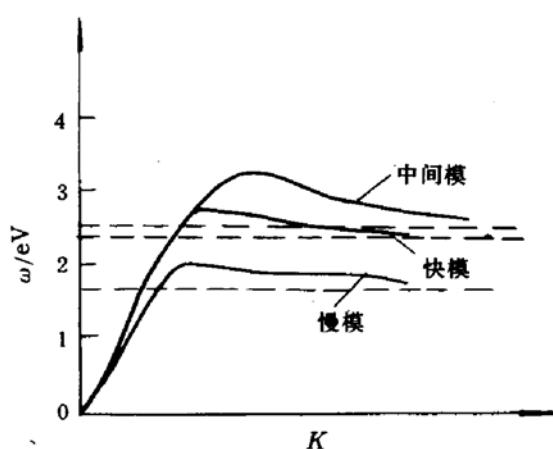


图 4 MIS 结中, SPP 色散曲线

## 4 MIS 结发光光谱及讨论

图 5(a), (b), (c) 分别为外加不同偏压时的 MIS 隧道发光结的发光光谱。从图 5(a) 可看出, 当外加偏压为 7.5V 时, 发光光谱有三个峰, 分别位于 500nm(2.5eV)、630nm(2.0eV)

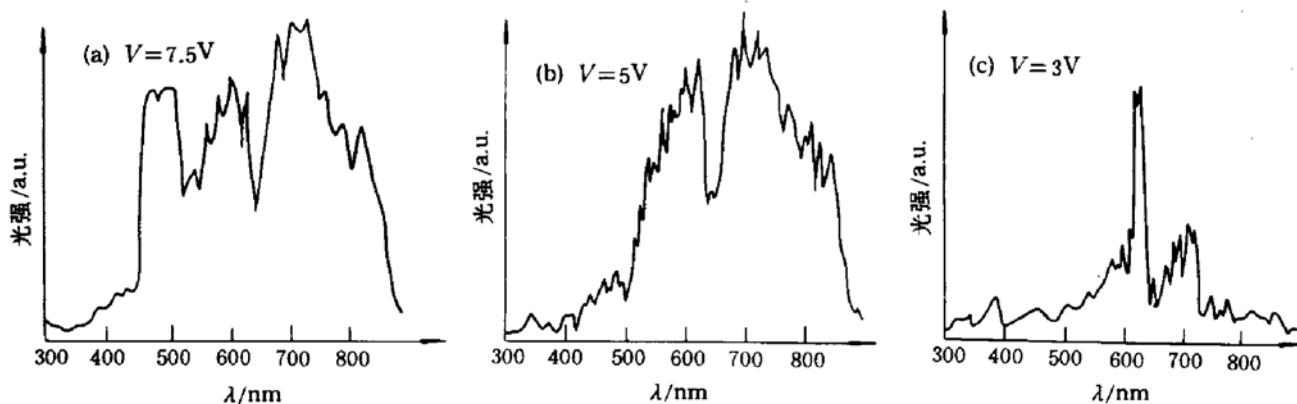


图 5 MIS 结发光光谱

和 750nm(1.68eV)处,与 MIS 结中 SPP 三模式比较,正好分别对应于 SPP 中间模(渐近频率为 2.52eV)、SPP 快模(渐近频率为 2.42eV)和 SPP 慢模(渐近频率为 1.57eV),其中 2.0eV 峰与快模渐近频率 2.42eV 有较大偏离,主要是因为 Au 在 2.5eV 附近有一强吸收峰造成的<sup>[11]</sup>。

当偏压降至 5V 时(图 5(b)),发现 500nm 峰消失而其它两峰不变,这是因为偏压为 5V 时,由于硅中等离子振荡频率为 5.52eV. 因此激发不起硅中等离子振荡,激发不起 Si/SiO<sub>2</sub> 界面的 SPP 模式,故 500nm 峰消失。

当偏压进一步降为 3V 时,见图 5(c) 所示,发现 630nm 峰与 750nm 峰幅度下降,630nm 峰比 750nm 峰幅度降得少,这是因为 630nm 峰对应 Au/Vacuum 界面 SPP 快模,750nm 峰对应 Au/SiO<sub>2</sub> 界面 SPP 慢模,而在 Au/Vacuum 界面的快模比在 Au/SiO<sub>2</sub> 界面慢模衰减小。

从光谱分析可得,MIS 结的发光机理与 MIM 结一致,首先结加偏压后,电子从 Si 隧穿 SiO<sub>2</sub> 势垒,激发 MIS 结中 SPP 三个模式,然后 SPP 各模式与表面随机粗糙度耦合发出光子。

从光谱分析还发现,发光光谱高能峰与 Sr 等离子体振荡频率有关,从理论上讲,调节掺杂浓度,改变硅中等离子体振荡频率,可实现不同位置高能峰的光发射,这无疑对研究蓝、绿光发射有重大意义。

## 5 结束语

众所周知,硅为间接带隙半导体,发光效率低,而且主要在红光及红外波段,许多学者致力于实现硅短波长发光,如多孔硅发光研究,然而稳定性差且进展缓慢. 故现在大部分光电器件用 II-V 族材料制作,而 II-V 族材料与硅不兼容,很难实现光电集成,且价格昂贵. 工艺简单、成本低廉的 MIS 隧道发光结能克服以上缺点,与集成工艺完全兼容,有望作为光源和开发新型光电器件应用于集成光学和光子学中,实现硅基光电子集成。

## 参 考 文 献

- [1] J. Lambe and S. L. McCarthy, Phys. Rev. Lett., 1976, **37**:923.
- [2] B. Laks and D. L. Mills, Phys. Rev., 1979, **B20**:4962.
- [3] S. Ushioda, J. E. Rutledge and R. M. Pierce, Phys. Rev., 1986, **B34**:6804.
- [4] J. Kirtley, T. N. Theis and J. C. Tsang, Phys. Rev., 1981, **B24**: 5650.
- [5] Z. Szentirmay, Prog. Quantum Electron., 1991, **15** :175~230.
- [6] Cai Yimin, Sun Chengxiu and Gao Zhonglin, Jpn. J. Appl. Phys., 1994, **33**:L1610~L1612..
- [7] J. Watanabe *et al.*, Jpn. J. App. Phys., 1993, **32**:99~104.
- [8] J. F. Donohue and E. Y. Wang, J. Appl. Phys., 1987, **62A**:1313.
- [9] Handbook of Optical Constant of Solids, Edward. D. Palik(eds), Academic Press, INC.
- [10] 刘秀喜等,《半导体工艺常用数据手册》.
- [11] P. Dawson and D. G. Walmsley, Solid State Communications, 1984, **50**(4):383.

## MIS (Au-SiO<sub>2</sub>-Si)Tunneling Light-Emission Junction

Cai Yimin, Sun Chengxiu and Gao Zhonglin

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

Received 25 August 1995, revised manuscript received 10 January 1996

**Abstract** In order to overcome the instability of Al and increase its breakdown voltage, in the study of common MIM(AI-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-AI)Junction, we adopt Si instead of AI and fabricate MIS (Au-SiO<sub>2</sub>-Si) junction successfully. Good results are obtained in observing light emission of MIS junction. We introduce the MIS structure and its technology, analyse every SPP mode in MIS, discuss the light emission spectra of MIS junction with different bias voltages and describe the light emission mechanism of MIS.

**PACC:** 7340R