

# 金属/绝缘层/硅(MIS)隧道 二极管的发光机理\*

俞建华 孙承休 高中林 魏同立

(东南大学电子工程系 南京 210096)

王启明

(中国科学院半导体研究所 集成光电子学国家重点实验室 北京 100083)

**摘要** 金属/绝缘层/硅(MIS)隧道发光二极管的发光机理可以归结为表面等离极化激元(SPP)与界面粗糙度的耦合. 电流-电压特性曲线中 6.5V 附近的一个负阻和发射光谱中 475nm 的峰显示, 在硅/二氧化硅界面激发起了与之相应的等离子体振荡

PACC: 7340R

## 1 引言

硅基发光器件对集成光电子学有重要意义. 金属/绝缘层/硅(MIS)隧道发光二极管(Metal Insulator Silicon Light Emitting Tunnel Diode, 简称MISLED)是近几年来开始研究的一种硅基发光器件<sup>[1-3]</sup>. 它是在高掺杂的硅衬底上生长一层极薄的二氧化硅, 然后再蒸发一层金属而成. 与最早由Lambe和McCarthy在1976年开始研究的金属/绝缘层/金属(MM)隧道发光二极管(Metal Insulator Metal Light Emitting Tunnel Diode, 简称MML-LED)<sup>[4,5]</sup>相比较, 由于以硅基代替底电极铝, 以二氧化硅代替三氧化二铝, 因而器件性能的稳定性、可靠性、重复性及发光强度都有很大改善. 作为一种硅基发光器件, 由于它结构简单、工作电压低、响应速度快、与微电子工艺完全兼容等特点, 有希望在集成光电子学中获得广泛的应用.

我们小组在经过多年的MML-LED研究之后, 接着研究MISLED. 发现MISLED的发光机理可以引用MML-LED的发光机理. 但是在发射光谱中出现了起因于硅/二氧化硅界面处的等离子体振荡的可见光发射峰, 电流-电压特性中也显示出了相应的负阻(Negative Differential Resistance, 简称NDR)现象.

\* 本研究得到国家自然科学基金(69576006)、集成光电子学国家重点实验室的资助

俞建华 男, 1961年出生, 博士生, 讲师, 从事半导体光电子学研究  
孙承休 男, 1937年出生, 教授, 从事电致发光和半导体光电子学研究  
1998-07-21 收到, 1998-12-21 定稿

### 2 样品制备

取晶向为 111 的硅(Si)基片,体掺杂高浓度的锑(Sb),使其电阻率为  $3 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ , 然后在这种N型硅片上生长一层 50~ 80nm 二氧化硅,用光刻工艺在二氧化硅层上刻出一个直径 1~ 3mm 的小孔,再在小孔处生长一层 5~ 8nm 的二氧化硅 利用真空镀膜系统(真空度  $10^{-3} \text{Pa}$  数量级),在薄二氧化硅上蒸发一层 40~ 60nm 的Au薄膜,在背面蒸上一层Al 最后用低温银导电胶引出电极,这样便形成了一个发光直径为 1~ 3mm 的M ISLETD,如图 1 所示

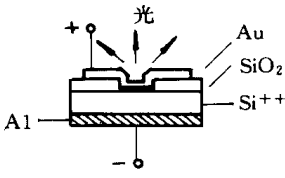


图 1 M ISLETD 的结构示意图

### 3 测试结果

样品置于室温大气中测量电流-电压特性和发射光谱

#### 3.1 电流-电压特性

采用四端法缓缓升高偏压测量得到的M ISLETD 的  $I-V$  特性曲线如图 2 所示 图中出现了负阻现象,分别出现在 1.5、3.4 和 6.5V 附近 在  $I-V$  曲线上显然电流过高,这是由于工艺条件限制了绝缘膜的质量,以致于漏电流过大

#### 3.2 发射光谱

M ISLETD 的发射光谱示于图 3 当电压增加时,发光强度随之增大 图 3 中曲线  $b$  包含了两个宽带可见光发射峰,分别位于 520~ 630nm 和 660~ 860nm. 主峰在 610nm 和 740nm 处,另外曲线  $b$  与  $a$  相比增加了一个小峰,位于 475nm . 由于光谱仪未用标准光源校准强度,故测

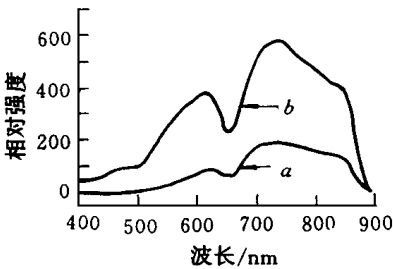


图 3 M IS 隧道二极管的发射光谱

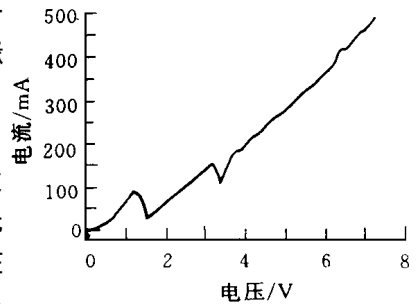


图 2 M IS 隧道二极管的电流-电压特性曲线

得的光谱强度为相对值 另外,用光强测定仪(Model 20  $\times$  LA, Fiber Optic Multimeter, Photodyne, Inc, America)测得面积为  $3\text{mm}^2$  的样品正常发光时的辐射总功率为  $62\mu\text{W}$ .

### 4 讨论

#### 4.1 Si的等离子体振荡

实验中所用的硅为N型重掺杂,可用金属的体等离子体频率公式

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

来代替 设杂质全部电离,则电子浓度  $n = 2.5 \times 10^{25} \text{m}^{-3}$ ,  $e$  为电子电荷;  $\epsilon_0$  为真空介电常数;  $m^*$  为电子的有效质量,  $m^* = 0.26m_0$  [6].  $m_0$  为自由电子质量,计算得到  $\omega_p = 5.53 \times 10^{14} \text{s}^{-1}$ , 能量  $\hbar\omega_p = 0.364\text{eV}$ , 这样的等离子体振荡频率不能引起可见光发射

我们认为当偏压增加到一定值时,电子由 Si 内部流向  $\text{Si}^{++}/\text{SiO}_2$  界面时,产生电子的

积累,这是一种动态的电荷积累效应。另外,由于晶向为 111 的界面陷阱<sup>[7]</sup>的作用,使  $\text{Si}^{++}/\text{SiO}_2$  界面  $\text{Si}^{++}$  一侧产生电子积累。这两种积累效应就使靠近界面的薄层内( $\text{Si}^{++}$  一侧)的电子浓度高于掺杂浓度 1~2 个数量级,此时电子的等离子体振荡频率足以产生可见光发射。这种效应在一定的偏压下才能出现。

#### 4.2 负阻现象

M ISLETD 的第一、二个负阻现象的形成机理,是由于当结中偏压达到一定值时,激发起较强的表面等离极化激元(Surface Plasmon Polariton,简称 SPP)<sup>[8]</sup>,有部分电子束缚于界面,对电路中总电流无贡献,这一点类似于 M MLETD 的 NDR 现象<sup>[9]</sup>。至于第三个负阻(6.5V 附近),则是由于激起了 Si 中的表面等离子体振荡。

#### 4.3 发光机理

M ISLETD 中各界面(空气/Au、Au/SiO<sub>2</sub>)的 SPP 模式的渐近频率  $\omega_t$ ,参考 M M 中的电磁场理论<sup>[10]</sup>可知:

$$\omega_t = \omega_p / (1 + \epsilon)^{1/2} \quad (2)$$

SPP 在各界面的渐近频率  $\omega_t$  用能量  $\hbar\omega_t$  可分别表示为:

空气/Au 界面: 金的  $\hbar\omega_p = 3.42\text{eV}$ ,  $\epsilon = 1$ ,  $\hbar\omega_t = 2.42\text{eV}$ , 对应  $\lambda = 596\text{nm}$

Au/Si 界面: 金的  $\hbar\omega_p = 3.42\text{eV}$ ,  $\epsilon = 3.9$ ,  $\hbar\omega_t = 1.54\text{eV}$ , 对应  $\lambda = 806\text{nm}$

按照 M MLETD 的两步发光机理<sup>[7]</sup>: 外加偏压激发 M ISLETD 中的 SPP, SPP 与表面粗糙度耦合发射光子。520~630nm 和 660~860nm 的峰分别对应于空气/Au 和 Au/Si 界面的 SPP 与界面粗糙度的耦合辐射。而 475nm 峰对应 SiO<sub>2</sub>/Si 界面的 SPP 与粗糙度的耦合辐射。这种 SPP 的频率所对应的电子浓度由于电子动态积累效应而比静态时增大。经推算可知:  $\hbar\omega_t = 2.61\text{eV}$ ,  $\hbar\omega_p = 5.78\text{eV}$ , 等效电子浓度  $n = 1.28 \times 10^{27}\text{m}^{-3}$ 。

## 5 结论

金属/绝缘层/硅隧道发光二极管(M ISLETD)的发光机理可以引用金属/绝缘层/金属隧道发光二极管(M MLETD)中的界面等离极化激元(SPP)与界面粗糙度的耦合发光理论。硅/二氧化硅界面的引起蓝光辐射的 SPP 起源于硅中动态电荷积累效应。M ISLETD 发射光谱中 475nm 峰和  $I$ - $V$  曲线 6.5V 处的负阻现象为这种电荷积累效应提供了证据。

## 参 考 文 献

- [1] Watanabe J., Uehara Y., Murota J. and Ushida S., Jpn. J. Appl. Phys., 1993, 32(1A): 99~104
- [2] Sun Chengxiu, Zheng Youwen, Gao Zhengli, Chinese Journal of Electronics, 1996, 5(1): 44~48
- [3] 蔡益民, 孙承休, 高中林, 半导体学报, 1996, 17(11): 817~821
- [4] Lambe J., McCarthy S. L., Phys. Rev. Lett., 1976, 37: 923~927
- [5] Szentimay Z., Prog. Quantum Electron., 1991, 15: 175~229
- [6] Edwards D. F., in "Handbook of Optical Constants of Solids", edited by Palik E. D., ACADEMIC PRESS, NC., Florida, America, 1985, P. 547~569
- [7] Sze S. M., Physics of Semiconductor Devices, 2nd edition, John Wiley & Sons, Inc. New York, 1981, p. 542
- [8] Mills D. L., Weber M., and Laks B., in Tunneling Spectroscopy, Edited by Hansma P. K. (Plenum, New York, 1982), P. 121~151

- [9] 俞建华, 孙承休, 王茂祥, 等, 物理学报, 1998, 47(2): 300~ 306  
[10] Donohue J. F. and Wang E. Y. J. Appl Phys, 1987, 62(4): 1313~ 1317

## Mechanism of Light Emission From Metal/Insulator/Silicon (MIS) Tunnel Diode

Yu Jianhua, Sun Chengxiu, Gao Zhonglin, Wei Tongli

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

Wang Qing

*(National Integrated Optoelectronics Key Laboratory, Institute of Semiconductors,  
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)*

Received 21 July 1998, revised manuscript received 21 December 1998

**Abstract** Light emission from Metal/Insulator/Silicon (MIS) tunnel diode can be attributed to that the Surface Plasmon Polariton (SPP) is coupled to photon by surface roughness. In our experiments, the Negative Differential Resistance (NDR) is occurred around 6.5 volt in the current-voltage curve of MIS tunnel diode, and a radiative peak is near 475nm on its light emission spectrum. From these we consider that the surface plasma can be coupled to emissive photons which are excited in silicon of MIS tunnel diode.

**PACC:** 7340R