

电子束控制放电 CO₂ 激光器用于 半导体诱导掺杂的研究

范安辅

钟涛 林理彬

(四川大学光电系, 成都 610064)

(四川大学物理系)

提要: 电子束控制放电 CO₂ 激光器的脉冲能量是~50 J, 光斑直径为~ ϕ 60 mm, 聚焦后光斑直径为~ ϕ 20 mm, 用该激光器在硅中诱导掺入杂质锑和铝, 得到了浅突变 *p-n* 结。结的大小为直径 ϕ 10~15 mm, 最大为 ϕ 20 mm, 结深为 0.2~0.7 μ m, 并具有~500 mV 的光生电压。

关键词: 电子束, 控制放电, 诱导掺杂

Study on induced doping to semiconductor by *e*-beam controlled discharge CO₂ laser

Fan Anfu

(Department of Opto-Electric Science and Technology, Sichuan University, Chengdu)

Zhong Tao, Lin Libin

(Physics Department, Sichuan University, Chengdu)

Abstract: The pulse energy of *e*-beam controlled discharge CO₂ laser is 50 J. The diameter of light spot is ϕ 60 mm and after being focused it becomes to ϕ 20 mm. The induced doping of stibium (Sb) or aluminium (Al) in silicon (Si) is carried out by CO₂ laser. A shallower of *p-n* junction with a diameter of 10~15 mm (max. 20 mm) and a depth of 0.2~0.7 μ m is obtained. Photo-voltage of *p-n* junction is about 500 mV.

Key words: *e*-beam, controlled discharge, induced doping

一、引言

用激光对半导体诱导掺杂, 人们常采用红宝石激光、Nd³⁺:YAG 激光和 Nd³⁺:glass 激光^[1,2]。这些固体激光器输出的激光波长较短, 半导体硅对较短波长的激光吸收很强, 因而使掺杂易于进行。但是这些激光器难于提供面积较大的均匀的光功率密度, 因而对需要大面积 *p-n* 结的半导体器件(如半导体光电探测器, 太阳能电池等)来说, 激光掺杂遇到了困难。J. O. Muller^[3] 曾用多模红宝石激光(能量密度 0.8~2 J/cm², 束斑直径 6 mm), 采用重迭辐照扫描方法, 获得较大面积的 *p-n* 结, 但因多次激光扫描的效果难于控制, 掺杂很不均匀。我们用电子束控制放电的 CO₂ 激光器输出的脉冲激光能量大、光斑大这一特点, 在硅基片上激光辐

照诱导掺入锑和铝,形成的 $p-n$ 结,其直径可达 $\phi 10\sim 15$ mm,最大达到 $\phi 20$ mm,结深为 $0.2\sim 0.7\ \mu\text{m}$ 。研究了形成 $p-n$ 结的阈值能量密度、杂质浓度、结深的分布与预热温度的关系,测得的光生电压为 $400\sim 500$ mV。

二、激光装置

电子束控制放电 CO₂ 激光器作为诱导掺杂的光源。电子束参数为^[4]:束截面 60×10 cm²,束能量 $110\sim 230$ keV,束流 $6\sim 13$ kA,流强 $0.5\sim 3$ A·cm⁻²,脉宽 $0.7\sim 1.5$ μs 。激光器腔长 1.4 m,主放电为一仿罗可夫斯基型铝板,阴极用 $\phi 1$ mm、间距为 1 cm 的镍丝网,主放电距离为 7 cm。谐振腔的全反射镜用镀金的凹面镜, $R=15$ m,输出耦合用锗平面镜,对 $10.6\ \mu\text{m}$ 的透过率为 42% ,两镜直径为 $\phi 86$ mm。激光输出能量与主放电电压的关系如图 1 所示。激光打在热敏纸上的光斑其直径可达 $\phi 60$ mm,通过 KCl 晶体透镜聚焦后在焦点附近的光斑(打在黑色相纸上)其直径为 $\phi 20$ mm,如图 2 所示。从利用激光热效应的角度讲,光斑较均匀,符合大面积掺杂的要求。

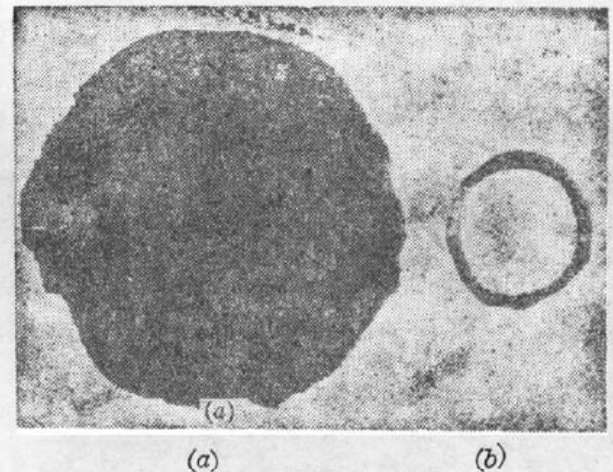
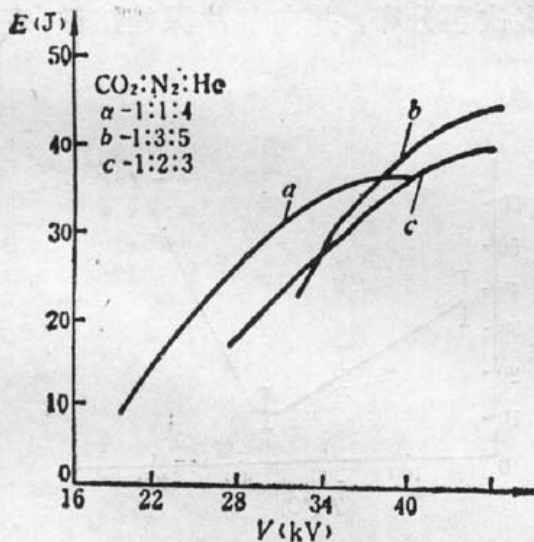


Fig. 1 Laser energy vs. master discharge voltage.

Fig. 2 Light spot of laser
(a) before focusing; (b) after focusing

三、实验方法

掺杂样片是硅中掺锑(Sb)和硅中掺铝(Al)两种,前者是 P 型单晶硅片,后者是 N 型单晶硅片。晶向都是 $\langle 111 \rangle$,电阻率 $10\ \Omega\ \text{cm}$,厚 0.4 mm。单面抛光,化学清洗烘干后,分别在高真空室($\sim 10^{-5}$ mm Hg)内蒸镀一层 Sb 和 Al,纯度都是 99.999% ,镀层厚度在 $20\sim 200$ nm 范围。

硅基片的红外吸收谱如图 3 所示。我们看到 $10.6\ \mu\text{m}$ 激光在硅片中透过率达 33% ,激光的作用不足以使杂质层和硅近表面层熔化而实现扩散掺杂。但硅片对红外激光的吸收系数随温度的增加有一显著的陡升^[5,6]。我们采用基片预热和激光背面辐照,使激光穿过 0.4 mm 厚的硅片后在硅与杂质层的界面上被大量吸收。

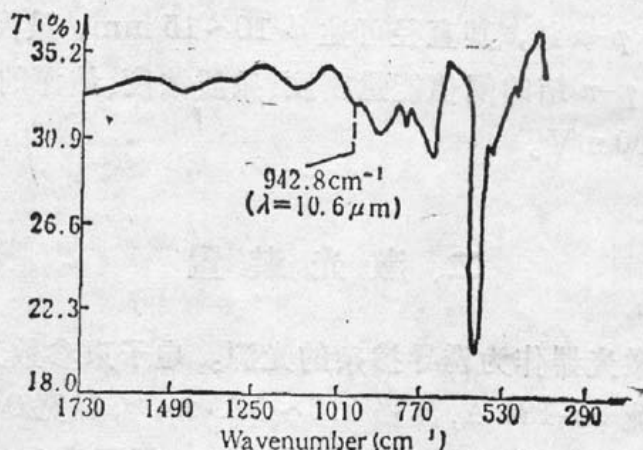


Fig. 3 Infrared absorption spectrum of crystal Si

四、实验结果

用扫描电子显微镜 (SEM) 观察激光掺杂后样品的表面形貌 (图 4 所示)。显微形貌表明, 样品表面出现熔融的痕迹, 固液界面呈现不稳定形态, 在多个激光脉冲作用下, 表面不平整度减轻。这是由于多个脉冲的退火作用, 使表面杂质经过多次再分布, 并向基片深处扩散, 表面状态也趋于均匀。



Fig. 4 Microphotogram feature of doping sample (Si-Sb)

- (a) 25 J/cm^2 , preheat T 250°C , 1 shot
 (b) 25 J/cm^2 , preheat T 250°C , 5 shots

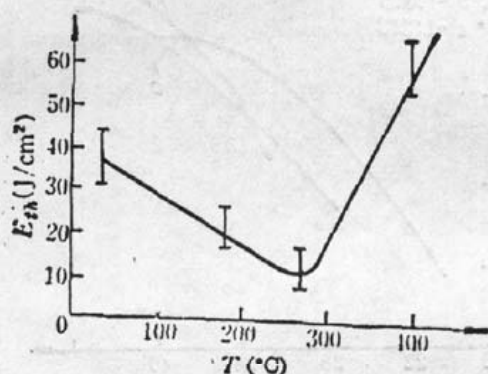


Fig. 5 Threshold energy density E_{th} vs preheat temperature T in forming $p-n$ junction (Si-Al)

测量激光辐照后的样片是否明显地形成 $p-n$ 结, 发现存在激光掺杂的阈值能量密度 E_{th} , 而且阈值能量密度与基片预热温度有关。预热温度太低和太高都难以掺杂。图 5 表明, 随着预热温度的升高, 掺杂所需要的光能密度下降, 在 260°C 左右降至最低值 (10 J/cm^2), 之后阈值随温度增高上升很快, 接近 400°C 时, 几乎不能诱导掺杂。这个现象出现的原因在于: 随着温度升高, 硅中自由载流子浓度增加导致吸收加强, 而当温度高于 300°C 时, 吸收系数开始数量级地增加, 发生对 CO_2 激光的增强吸收^[5, 6]。在我们的实验中, 激光穿过 0.4 mm 厚的硅片后到达镀有杂质层的界面, 从室温到 260°C 范围, 吸收系数随温度上升, 激光在穿过硅片过程中和在硅-杂质层界面的吸收率都相应增大, 反映为阈值降低。但当温度接近 300°C 时, 随着硅对 CO_2 激光的吸收陡增, 光能的大部分消耗在穿越硅片的过程中, 最后到达杂质层的光能

量已很小,因而导致阈值的迅速上升。

用卢瑟福背散射(RBS)技术分析硅中杂质元素的浓度和深度。从静电加速器获得 2 MeV 的 ⁴He⁺ 离子束(束流为 10⁻⁸A,束直径 1mm),准直后打在靶样品 Si-Sb 上,用金硅面垒半导体探测器测量大角度(170°)散射的离子能谱,用束流积分仪记录束流强度,通过计算得到的掺杂浓度和深度分布示于图 6。我们看到,掺杂浓度较高, Sb 杂质的表面浓度超过平衡固溶度(6×10¹⁹ cm⁻³),结深在 0.2~0.7 μm 范围, p-n 结是浅突变结。预热温度较高时,掺杂浓度较高,深度较大。实验还表明,镀层越厚,掺杂量越高,结深也较大;在相同镀层和相同预热温度下,多个激光脉冲重复辐照将增加掺杂量和增大结深,同时使杂质在硅中的分布均匀。

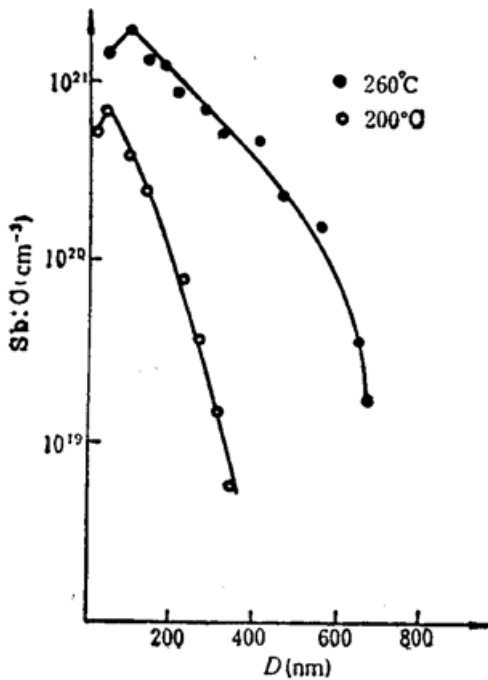


Fig. 6 Distribution of dopant density and depth at different preheat temperatures (Si-Sb, plating layer thickness 56 nm, energy density 25 J/cm², 5 shots. 1 shot: pulse energy is 38 J, pulse width is 500 ns)

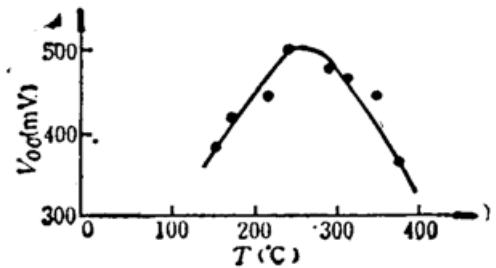


Fig. 7 Photo-voltage of p-n junction at different preheat temperatures (Si-Al, 23 J/cm², 5 shots)

在 N 型硅片上扩入杂质 Al,形成 p-n 结,做上电极就是一个太阳能电池。用氙灯太阳模拟器 AM₁ 作光源(光功率密度 100 mW/cm²),照射样品 Si-Al 的 p-n 结,测得的光生开路电压与预热温度的关系示于图 7,在预热温度 260°C、用光能密度 23 J/cm² 辐照的样品中,得到了约 500 mV 的光生开路电压,已接近太阳能电池要求的参数。

参 考 文 献

- 1 Ying C. Kiang, J. Randal Moulic *et al.*, *IBM J. Res. Develop.*, **26**, 171 (1982)
- 2 申 勇 *et al.*, *核电子学与探测技术*, **6**(3), 154 (1986)
- 3 J. C. Muller *et al.*, *IEEE Trans. Electron Devices*, **ED-27**(4), 875 (1980)
- 4 范安辅 *et al.*, *四川大学学报*, **1**, 34 (1985)
- 5 M. R. T. Siregar, W. Liithy *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **36**, 787 (1980)
- 6 李元恒,李春金, *中国激光*, **10**(1), 28 (1982)