

激光技术制作硅太阳能电池的现状和展望

· 兰州大学物理系 张思玉 郑克全 ·

本文概述了激光技术制作太阳能电池的发展状况,对离子注入和沉积掺杂硅太阳能电池的激光退火与热退火作了比较,激光退火离子注入Si太阳能电池转换效率达16.6% (AMI),激光退火沉积在Si片上的Al和Sb膜制得的太阳能电池转换效率达到14.3% (AMI),沉积法制作的电池具有成本低和易于制作等优点,这种技术简单,在大规模生产太阳能电池时将得到广泛的应用。

引 言

自从1975年苏联首先将激光技术应用于激光退火消除离子注入硅中的缺陷被报导以来^[1,2],引起了许多实验室、科技工作者的极大重视,首先在贝尔实验室和橡树岭国家实验室开始了这项研究工作,此后,美国的许多其他实验室相继开展了激光技术应用于半导体工业的研究,包括斯坦福电子学实验室,休斯研究实验室,美国无线电公司实验室,麻省理工学院林肯实验室,国际商用电子计算机公司沃森研究中心,洛克威尔国际科研中心等等,随着研究工作不断地深入,激光技术应用的研究从半导体材料扩展到整个微电子工业,而且很多应用已成为微电子工业成熟的工艺。如激光切片,切割,打微孔,电阻和电容的微调,激光焊接等。激光束加热半导体局部表面(退火)工艺包括了以下内容。改变注入离子的分布、减少晶格的损伤量,激活掺杂,形成半导体,研究表面再结晶过程,形成欧姆接触、熔接键在半导体基片上的金属膜等。激光退火半导体器件越来越受到普遍重视,在1981年5月在美国波士顿召开的激光辐照在微电子学方面应用的国际会议上,有关激光退火的学术论文占整个学术论文一半之多。研究证明,激光退火比目前采用的常规热退火有突出的优点,现概述一下制作硅太阳能电池时激光退火比常规热退火所具备的优点。

目前,制造Si太阳能电池通常采用两种工

艺对半导体器件掺杂;一、热扩散(即高温掺杂),这种方法在硅片表面上有高浓度未激活的掺杂原子。二、离子注入对半导体器件掺杂,这是目前极重要的低温浅结掺杂手段,它比热扩散有明显的优点,原则上说,它能将所有不同的杂质注入到半导体衬底中去,不受固溶度和扩散系数的影响,掺杂深度和浓度可以通过加速离子的能量和剂量精确控制。但注入过程也带来了两个问题。1)注入层产生晶格辐射损伤。严重情况下,注入层变成非晶。2)注入杂质非替位性,即大多数杂质原子处于非激活状态,以往主要靠热退火解决这两个问题,例如将注入杂质的Si片在1000°C炉中进行约30 min的热处理,这种处理方式使衬底同时经受了高温处理,因而在消除注入层辐射损伤的同时,也引起注入杂质的再分布,注入图形发生畸变,离子注入层表面被沾污,也会使杂质析出,对化合物半导体发生热分解等不利因素。激光应用于上述工艺中,问题就不难得到解决。众所周知,激光束光斑小,适宜于亚毫米至亚微米级精密微细加工和局部加工,激光能量密度大,瞬时功率高,适宜于快速加工及其材料的表面热处理,也适宜高硬度和难熔材料(如锗,硅,金刚石,宝石和陶瓷等)的加工。激光单色性好,容易实现波长可调,亦可进行选择性加工,激光加工属于非接触性加工,不沾污被加工样品,激光束可通过光学系统,使光束扩散或聚焦,实现光束能量和光斑尺寸可调,是应用于半导体器件非常适宜的工具。概括大

量研究结果, 激光退火的优点是:

1. 激光退火比热退火时间短。
2. 没有明显的扩散杂质再分布, 保持高度的局部性, 特别是对于 GaAs 保持化学配比不变。
3. 合金化效率较高。获得的高浓度电荷载流子在热退火下达不到。例如, 激光退火时, 硅内磷的浓度为 $2 \sim 3 \times 10^{21}/\text{cm}^3$ (硅中磷的溶解极限为 $10^{21}/\text{cm}^3$)。
4. 与一般热退火相比, 电荷载流子的电活动度提高 $5 \sim 7$ 倍。

目前制备太阳能电池用激光退火可达到最大的实际效果, 由于激光退火的结果, 太阳能电池的效率成功地提高了一倍^[8]。

下面综合近年来国外激光技术对研究太阳能电池的发展概况, 如激光退火与热退火太阳能电池各种特性的比较、掺杂 Si 太阳能电池和沉积膜 Si 太阳能电池的研究结果等作一些概述。

掺杂硅太阳能电池的激光和热退火特性研究现状及其比较

为了获得低成本、高效率的太阳能电池, 必须改进太阳能电池材料及制造工艺。目前, 广泛采用热扩散或离子注入之后进行热退火的工艺来形成 p-n 结。近几年来, 国内外大量报道了利用脉冲激光或连续波激光退火掺杂硅片。因而使注入损伤的硅晶格再结晶, 并使注入掺杂原子完全激活^[4-7]。脉冲和连续波激光再结晶的机理互不相同, 脉冲激光再结晶是准液相外延, 而连续波激光再结晶是固相外延, S. Matsumoto 等人^[8]认为, 脉冲激光的作用是使衬底表面层熔化, 并引起注入掺杂剂再分布。连续波激光则使损伤层在低于其熔点的温度下再结晶, 保持注入掺杂剂的分布不再扩散, 这一点对于用多晶硅材料来制作太阳能电池可能是非常有利的, 因为这大体上可以避免晶粒边界扩散。目前虽然对离子注入激光退火再结晶机理的看法还存在争论, 但是采用脉冲和连续波激光退火制造太阳能电池都获得了很大的

成功。

目前, 采用的激光器种类很多, 但多数研究工作者用红宝石、Nd:YAG 和 CO₂ 激光器, 有一些研究工作者探索使用脉冲持续时间约 1 ms 的自由振荡模激光器^[4], 在使用染料激光 ($\lambda = 0.6 \mu\text{m}$) 对离子注入硅退火时得到了有希望的结果^[9]。最近, 用扫描连续波氩离子激光器 ($\lambda = 0.5 \mu\text{m}$), 氦 ($\lambda = 0.65 \mu\text{m}$) 和 ArF, KrF 激光器也都成功地使离子注入材料退了火^[9-10]。

如何选择激光器和退火方法, 这要取决于所研究的材料, 一般说来, 要求对激光能量有较高的吸收系数, 由于光能量为 $h\nu$, 因此 $h\nu$ 应大于强吸收半导体的能隙 E_g 。当能量足以引起熔化时, 会产生大量电子-空穴对, 而且这种等离子体本身将吸收和反射光。因此, 采用 Q 开关激光器时, 自由载流子吸收在退火过程中起主要作用, 而激光器以自由振荡时, 它不会有显著的影响^[11]。

表 1 列出了几种材料对红宝石激光器的吸收系数值。吸收系数的倒数为穿透深度, 这个深度正是 Si 中离子分布的典型范围。因此只要注入以后的吸收系数与结晶材料的吸收系数值相差不太大, 激光退火注入离子就是很适宜的。在这种情况下红宝石激光仅加热被注入的表面区。相反, 具有低吸收的激光, 如 CO₂ 激光可以均匀地加热整个样品厚度, 因此, 用 CO₂ 激光照射样品背面得到的效果更好。

为了照射大的样品, 需要直径大的激光束, 如果采用直径较小的光束则要求带有扫描系统, 而且要求照射在样品上的光束能量密度均匀, 否则会影响电池的特性和效率。

表 1 几种材料对红宝石激光的吸收系数 α 和穿透深度^[11]

材 料	吸收系数 α (cm^{-1})	穿透深度 $1/\alpha$ (μm)
Si*	4×10^3 (c) 10^8 (a)	8.0 (c), 0.1 (a)
GaAs	10^4	1.0
Ge	9×10^4	0.2
金属	10^6	0.01

* (a) 和 (c) 分别表示非晶 Si 和结晶 Si

离子注入硅片的激光退火与热退火特性的比较

利用激光退火半导体器件，在半导体工业中是很有意义的事。这种方法可以使非晶转变成单晶，细晶粒转变成大晶粒，或者因离子注入或热扩散掺杂受到严重损伤的晶格重新再结晶，采用激光退火与常规热退火相比具有很多优越性。如激光退火重新结晶时间短，激光退火只加热样品表面，对整体没有显著的影响，激光退火掺杂样品得到的载流子浓度，远超过热退火，同时能得到完美无位错的样品，如果掺杂浓度低于半导体材料的熔解度极限，就可以得到100%电激活载流子。而掺杂原子不会进行再分布。这一点具有重要的意义，而且对器件的制造特别有用。近几年来用激光退火制造太阳能电池引起了普遍重视^[13-16]。

图1是R.T.Young等人^[16]，用电阻为2~7Ωcm的n型(100)硅片，注入能量为35keV的硼离子，用脉冲宽度为20~25ns，激光能量密度为1.5J/cm²的红宝石激光退火与热退火(900℃, 30min和1100℃, 30min)获得掺杂电激活的结果比较。从图中曲线可以看出，由于样品在退火后往往留有广泛的损伤，900℃退火后自由载流子浓度的恢复相当差，经1100℃热退火后载流子浓度明显的增加，但也只达到激光退火样品的70%，因而，载流子浓度在~1.5×10¹⁶cm⁻²值达到饱和，这种现象是由于高注入剂量的样品中硼浓度比1100℃时在硅中的固溶度极限(~4×10²⁰cm⁻²)还高^[17]。结果未激活的硼离子沉积下来，另一方面采用

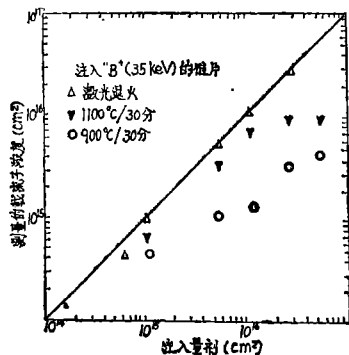


图1

激光退火，即使在至今所用过的最高剂量下，也能够获得完全的电激活。

S.Matsumoto等人研究了磷离子注入到单晶硅，冶金级(MG)多晶硅和Wacker型浇铸多晶硅衬底上，并采用连续波氩离子激光器退火，详细研究了掺杂剂的电活性，他们采用阳极氧化和Van der Pauw测量法测定了衬底载流子浓度，如图2~图4分别给出了单晶硅，MG型硅和Wacker型硅材料的载流子浓度分布，图2说明单晶硅样品中的载流子浓度分布与采用Pearson IV分布函数中的LSS动量求出的理论注入分布符合得很好^[17]。由此得出结论，注入掺杂剂被完全电激活而没有扩散，霍尔迁移率也与由所得的载流子浓度和Irvin曲线算出的Irvin迁移率相符合^[18]。这些数据意味着被掺杂引起的晶格损伤得到高质量的再生长。

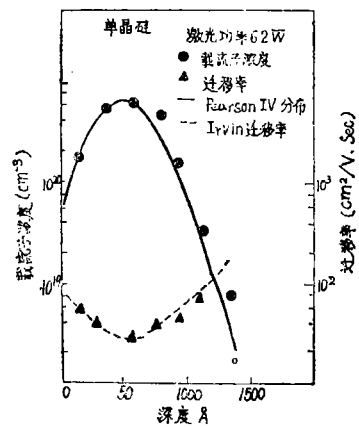


图2 单晶硅中载流子浓度、迁移率与深度的关系曲线

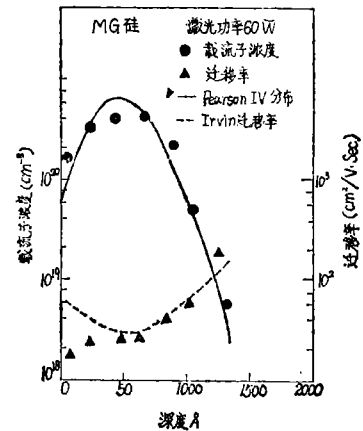


图3 MG硅的载流子浓度、迁移率随深度的变化

对于MG硅和Wacker型硅,不能得到完全电激活,其数据分别表示于图3和图4中,就MG型硅和Wacker型硅而言,在近峰处或近表面区域观察到不完全的电活性,在这些区域中,两种材料的霍尔迁移率都低于Irvin迁移率,这大概是由于MG硅和Wacker硅中含有大量有害杂质的缘故。

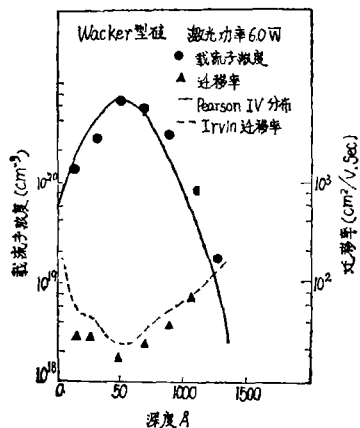


图4 Wacker型硅的载流子浓度和迁移率随深度的变化

在多晶硅上注入掺杂剂,进行激光退火在国外常采用氩离子激光器^[19-21]。在文献中^[21],对注入硼的多晶硅,利用不同的退火方式,也获得了成功,用1100°C、经30min,用调Q-Nd:YAG和CO₂激光分别退火结果得到各参量的比较,如表2所示。

从表2可以看出CO₂激光退火的效果比热退火和调Q-Nd:YAG激光退火都好,其中方块电阻比热退火下降近一个数量级,比调Q-

表2 注入B⁺(40keV、1×10¹⁵/cm²)到多晶硅衬底上在不同退火条件得到的R_□·μ·N值的比较^[21]

退火方式	R (Ω/□) (cm ² /V·s)	μ (cm ² /V·s)	N (cm ⁻³)
CO ₂ LA 8", 95W	173	29.4	2.46 × 10 ¹⁹
Q-Nd:YAG 4.5W9k	523	8.5	2.7 × 10 ¹⁹
1100°C 30' N ₂ 中	936	9.5	1.42 × 10 ¹⁹

Nd:YAG激光退火要低三倍,而迁移率比热退火约大三倍,掺杂激活浓度近似高一倍。

激光诱导沉积掺杂扩散p-n结及其特征

除了离子注入和热扩散掺杂制造p-n结外,激光诱导沉积掺杂剂扩散^[14,23,24]提供了另一种把掺杂剂掺到表面层的廉价方法,在这种方法中,将掺杂物质如硼、铝、镓、磷和铋等,用沉积、真空蒸发、溅射、涂敷等技术将掺杂物质沉积在衬底的表面上,沉积厚度约在50~200Å范围之间,然后用激光辐照沉积膜的表面或者背面,在激光束引起沉积膜的熔化过程中,由于液态扩散结果,掺杂剂就掺入衬底样品中去,形成掺杂剂一定浓度和深度的分布,对于某些掺杂剂而言,在表面附近有一层高浓度区,事实上其浓度已超过平衡的固溶度的极限,还有一个沿结方向浓度很快减小的过渡区^[24],这样的分布所产生的高浓度表面势垒能把光子从表面上反射并减少表面复合。

早在1968年就已用沉积技术研制成功了Si二极管^[23],如(a)利用以自由振荡模工作的红宝石激光照射沉积在P型Si上的磷,(b)用调Q开关Nd:YAG激光照射蒸发在n型Si上的铝^[25]。(c)用CO₂激光照射沉积在P型Si上的硼或磷^[26]。用前两种方法制成的二极管尺寸都很小,但是最近用方法(c)和用Q开关红宝石激光为沉积在n型Si上的硼(或铝)退火,制成质量更高的大面积(~100mm²)p-n结二极管^[24]。如在文献[26]中,他们采用10Ω·mm<100>P型单晶硅上涂上一层硼或磷,分别用脉冲钕玻璃激光和连续波CO₂激光照射,钕玻璃激光输出能量为60J,脉冲持续时间为7~8ms光束直径聚焦成2mm直径,而连续CO₂激光器输出功率为17W,光束直径为2mm,P型掺杂使用的硼源配方为三氧化二硼,可得到表面掺杂浓度为10²⁰/cm²。用连续波CO₂激光束照射(分别在氧气,氮气或真空中)都能得到整流特性好的p-n结,如图5所示。这差不多接近理想的p-n结I-V特性曲线。表3是E.Fogarassy等人用样品厚度为300μm的硅片、晶向<111>,电阻率为1.5~3Ω

表3 沉积掺杂浓度与激活浓度的比较, 以及其他参量数据^[14]

沉积杂质	沉积厚度 (Å)	激光能量 (J/cm ²)	片电阻率 (Ω/□)	沉积浓度 (cm ⁻²)	激活浓度 (cm ⁻²)	迁移率 cm ² ·V ⁻¹ ·s ⁻¹
P	500	1.5	85	...	1.6 × 10 ¹⁶	45
Sb	40	1.5	26	1.1 × 10 ¹⁶	1.1 × 10 ¹⁶	28
Al	100	1.5	65	...	9 × 10 ¹⁵	10
Ga	50	1.5	60	7.5 × 10 ¹⁵	7 × 10 ¹⁵	15
Bi	100~150	1.5	100	2.1 × 10 ¹⁵	1.55 × 10 ¹⁵	40
In	50~100	1.5	870	1 × 10 ¹⁶	8 × 10 ¹⁴	9

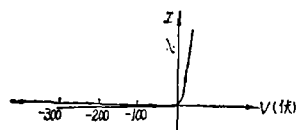


图5 p-n 结 I-V 特性曲线

cm作为衬底,并在衬底上用化学法沉积不同的各种物质,用能量密度为1.1~2J/cm²红宝石激光器,脉冲宽度为20ns,照射沉积在表面层掺杂剂进行激光退火,获得各种参量的实验数据。

综合以上研究结果,采用激光照射涂层硅片,可以制造深为几十至几百埃的突变 p-n, nn⁺, pp⁺, p⁺nn⁺, n⁺np⁺结,与热扩散相比能得到更高载流子浓度,与离子注入相比,激光器的价格只有离子注入机的十分之一,设备简单,操作容易,它们都是低温浅结掺杂方法,都可得到很高的杂质浓度,但激光掺杂,特别采用转换效率高的CO₂激光器从背面照射进行掺杂或合金化,不但不会引起硅正面的结晶的损伤,反而会吸除已有的各种微缺陷,用这种技术来制造肖特基势垒和合金欧姆接触。对研究微波管、肖特基势垒二极管和高速浅结集成电路是很有益的。

用激光退火热扩散和离子注入衬底,可使损伤的晶格获得完全的恢复,激活载流子浓度高,片电阻率降低,迁移率高,不会引起注入杂质的再分布,也不会引起器件新的缺陷和污染。比常规热退火优越,激光退火在半导体器件生产中是一种优越的新工艺。

采用激光退火研制高效率硅太阳能电池

目前,采用激光退火离子注入,热扩散,和沉积掺杂很有实用价值是高效率硅太阳能电池

的研制,用激光退火技术制作太阳能电池的特点是无须特别强调电池的设计,就可以得到33~35.6mA/cm²范围内高的短路电流密度(J_s)。选择适当激光能量密度,更好控制凝固速率,使发射区掺杂优化并增加衬底的少子扩散长度,从而进一步提高开路电压V_{oc}和填充因子FF,就可以获得高效率太阳能电池^[16]。

用激光退火离子注入的半导体器件时,从宏观上来看,影响强光束和样品的相互作用的参数是激光的波长λ,能量密度E,脉冲持续时间τ或扫描速度以及激光退火时衬底的温度T_s,对于一个选择好了的、按一定模式工作的激光器来说,只是控制激光能量密度E和衬底温度T,这两个最容易调节变量,根据在样品中热传导的理论计算表明^[27]。E和T,对熔化深度与再生长速率V影响很大,在结晶层的质量控制中,这是两个最重要的参数。

S. Matsumoto 等人^[8]以单晶硅、MG多晶硅和Wacker型多晶硅为衬底,注入离子能量为40keV的磷和硼,其剂量为4.0 × 10¹⁵cm⁻²,衬底三种材料参量是(1)电阻率为1~4Ω·cm晶向<100>的P型单晶硅。(2)电阻率为7.5Ω·cm的P型冶金级多晶硅(红外透镜材料)。(3)电阻率为14Ω·cm的P型Wacker型多晶硅,采用连续波氩离子激光制造的太阳能电池,其转换效率分别:单晶硅为衬底的10.8~13.4%(AM₁),MG多晶硅为9.9~10.3%(AM₁),Wacker浇铸多晶硅为9.8~10.5%(AM₁)。

R. T. Young 等人^[15]采用直径为7.5cm、电阻率为2~7Ω·cm的n型<100>单晶硅片,以B⁺能量为5~35keV注入,剂量为5 × 10¹⁵~6 ×

$10^{15}/\text{cm}^2$, 激光退火在真空中进行的, 用阿波罗 Q 开关红宝石激光器, 激光器以多模工作, 光束直径为 2.5cm, 能量密度在 $1\sim 2\text{J}/\text{cm}^2$ 之间, 脉冲持续时间为 $20\sim 25\text{ns}$, 制造的 p-n 结电池, 其转换效率为 $12.7\sim 15\%$ (AM1) 之间, 这个结果与文献[28, 30]的结果相同, 这样的效率可和通常采用热扩散或离子注入之后再热退火不采用背面场制造的 p-n 结太阳能电池相比了。

为了进一步提高电池的转换效率, R. T. Young 等人制作了 p^+nn^+ 结构的太阳能电池, 利用激光损伤吸收效应改善少子扩散长度, 浅结低温离子注入 (5keV) 后, 经 400°C 激光退火消除注入损伤, 利用激光引起背面扩散掺杂产生背表面场。在电池背表面上沉积 100Å 厚的 Sb 膜, 而后用一个能量密度为 $1.6\text{J}/\text{cm}^2$ 的脉冲红宝石激光照射样品, 将 Sb 扩散到样品中去

产生背表面场, 这种方法制作的 p^+nn^+ 结构电池其转换效率达到了 $16\sim 16.6\%$ (AM1)。

为了提高太阳能电池的转换效率, 降低电池的成本, 使它达到大规模工业生产的要求, 人们对太阳能电池的材料和改进制作工艺进行了多方面的研究, 取得了一定的进展, 利用激光引起掺杂剂扩散技术制作太阳能电池是一种工艺较简单, 花费低廉, 应用于实际生产很可能成为一种很有希望的新工艺。E. Fogarassy 等人用 $300\mu\text{m}$ 厚的硅晶片 (111) 电阻率为 $1.5\sim 3\Omega\cdot\text{cm}$, 采用沉积技术, 沉积不同的掺杂剂如 P、Al、Sb、Ga、Bi、In 等杂质, 用能量为 $1.1\sim 2\text{J}/\text{cm}^2$ 红宝石激光器, 脉冲持续时间为 20ns 的光束照射, 在无背面场和有背面场两种情况下, 制作的太阳能电池各种电参量及其转换效率分别列在表 4 和表 5 中。

表 4 用沉积技术制作的太阳能电池参量及转换效率

沉积掺杂	沉积厚度 (Å)	激光能量 (J/cm^2)	V_{oc} (mV)	J_{sc} (mA/cm^2)	FF	无背面场 $\eta\%$
P	500	1.5	555	22	0.72	9
Sb	40	1.5	550	26	0.75	10.6
Al	100	1.5	522	28	0.73	10.7
Ga	50	1.5	548	24	0.64	8
Bi	100~150	1.5	530	27.5	0.62	9
In	50~100	1.5	480	<20	<0.5	—
P	60	1.5	575	24	0.69	9.6

表 5 用沉积法加背面场制作电池各种参数及其转换效率

沉积掺杂	沉积厚度 (Å)	激光能量 (J/cm^2)	V_{oc} (mV)	J_{sc} (mA/cm^2)	FF	无背面场 $\eta\%$
Sb	40	1.5	560	35	0.72	14.1
Al	100	1.5	536	35.6	0.73	14.3

展 望

单晶硅太阳能电池用于实际已有二十年的历史, 目前, 工业生产的 Si 太阳能电池其光电转换效率已达到 $10\sim 14\%$ (AM1), 实验室研究的电池效率达到 $18\sim 19\%$ (AM1)。理论计算效率达 22% (AM1)。由于单晶硅电池效率高, 稳定性好这是它的突出优点, 但是制造

单晶硅电池工艺复杂, 单晶硅本身成本高, 不宜工业上大规模生产和应用。目前, 人们正努力寻求廉价材料代替单晶硅和新的加工工艺。如用廉价冶金级多晶硅, 浇铸型的多晶硅以及非晶硅 ($\alpha\text{-Si}$) 来代替单晶硅。用沉积掺杂来代替常规的离子注入和热扩散掺杂。由于激光本身的固有特点, 用激光退火代替常规热退火, 大量研究表明这完全是可能的。人们在寻求新

的材料和新的工艺的研究已取得了一定的成果。但是要应用于大规模生产还有许多工作需要进一步探讨和研究。如若采用沉积在多晶硅片上的掺杂剂用激光引起扩散掺杂制造的电池的效率能达到单晶硅太阳能电池的转换效率的水平,这就会给太阳能电池工业带来崭新的面貌。

使用激光器件多样化:几年前,应用于激光退火,基本上是红宝石, YAG, 氩离子激光器,这似乎使人们认为这些激光器件已定型了,近几年已经发展到了 CO₂ 激光器, ArF, KrF, Nd:YAG 以及染料激光器等。为了满足大规模生产的要求,需要发展廉价,波长范围宽的脉冲和连续波激光器件。因此,激光器工作需进一步探索。

激光退火加工的机械化和自动化:进行大规模机械化和自动化生产这是太阳能电池工业基本要求,随着计算机和微处理器的推广和应用,激光加工设备也要列入计算机技术和微处理技术,要使激光退火达到高度机械化和自动化,事实上没有计算机和微处理器的控制,纵然激光本身有许多的优点,也仍然不可能使激光发挥其固有的优越性、效率、精度和定位准确度。对激光退火加工的机械化和自动化在国外也有不少的有关激光加工的厂家进行了试验性设计和极少量的生产。如美国的相干公司制造了一台 5000 型连续波激光退火加工系统。也有脉冲激光退火加工系统,也有连续波和脉冲混合两用加工系统,特别要提出的是霍洛比姆激光器公司的子公司控制激光器公司制造了一种激光退火/微型机加工系统,该系统提供了各种应用和各种选择方案,它能够使用连续波,脉冲或者 Q 开关激光器,因此使用者能够获得宽范围波长,平均功率,峰值功率,脉冲重复频率,脉冲宽度及光点的大小。可用的激光源包括 Nd:YAG、Nd 玻璃、红宝石、氩离子和氦离子等激光器件。它是一种接近实际应用的加工系统。

目前,激光退火的大量研究结果使人们对此颇为关注,例如沉积,利用激光切断化学键,

能使沉积在低温下进行,用这种技术制作的太阳能电池效率已达到 14.3%(AM1)。再如激光退火,已在 Si、GaAs 太阳能电池的制作过程中产生了极好的效果,用激光退火制作的 Si 太阳能电池使效率提高到 16.6%(AM1),用激光退火不会引起掺杂剂的移动和再分布,而且激光退火可进行选择性加速退火,这是炉温退火所不能达到的,脉冲激光退火不会出现一点热退火引起的缺陷,如晶体中的位错、堆垛层错和位错环等。由于激光退火正处于积极研究和发展阶段,当前,半导体的激光退火还没有定论。对激光退火的机理的看法还存在着争论,还有大量工作需要进一步探讨和研究,目前要在一些应用,例如激光退火、沉积等方面论述其经济效益还存在困难。

参考文献

- [1] Богатырев В. А.; Физ. и техн. полупроводников, 10, № 7, 1392(1976).
- [2] Хайбуллин И. Б.; Физ. и техн. полупроводников, 11, № 2, 330(1977).
- [3] М. Ф. Стельмах, АН СССР серия физическая, 1980, № 8, 1670.
- [4] G. A. Kachurin, Sov. Phys. Semicond, Vol. 9, 946(1976).
- [5] A. Gat, Appl. Phys. Lett, Vol. 32, 276(1978).
- [6] K. T. Young, Appl. Phys. Lett., Vol. 32, 139(1978).
- [7] G. K. Celler, Appl. Phys. Lett, Vol. 32, 464(1978).
- [8] S. Matsumoto, J. Appl. Phys, Vol. 53, №10, 7020-7025(1982).
- [9] D. R. Myers, Laser-Solid Inter actions and Laser Processing, Boston, 1978, AIP conf. Proc., №50, p. 563.
- [10] A. Gat, Appl. Phys. Lett, Vol. 32, 142(1978).
- [11] A. Lietoila, Appl. Phys. Letters, Vol. 34, 332(1979).
- [12] B. J. Sealy, J. Crystal Growth, Vol. 48, № 4, 655-665(1980).
- [13] J. C. C Fan, Appl. Phys. Lett, Vol. 34, 780(1979).
- [14] E. Fogarassy, J. Appl. Phys, Vol. 52, 1076(1981).
- [15] T. A. Muller, IEEE Trans. Electron Devices, ED-27, 815(1980).
- [16] R. T. Young, J. Appl. Phys., Vol. 52, № 2, 1178-1190(1982).
- [17] W. K. Hofker, Philips Res. Rep. Suppl. 8. 1975

(下转第32页)

行,也可用脉冲激光源实施。上述二项正确性检验都已得到满意结果。

五、试用情况和测量实例

一年多以来,该装置已在我所五个脉冲激光课题组试用,也曾为外单位验收进口的脉冲染料激光器。由于采用了微电脑,能实时处理大量数据,并显示、打印结果,因此能考察激光器工作的全过程。从打印纸带可对脉冲激光器的工作状态进行比较仔细的分析。还可有意识地改变、选择激光器的某些工作参数,观察对最大输出和稳定性的影响,从而使激光器得到最佳的调整。因此该装置不仅用作脉冲激光器稳定性指标测试,而且对脉冲激光器的研制、调试都有很大的帮助。

下面举出一些测量实例。表 I 是一台声光 Q 开关 YAG 激光器的测试纸带。平均值在 500 左右,标准差很大,可大至 100 以上(用“,”表示),这相当于百分稳定度大到 20% 以上,这是很差的例子。表 II 是一台电光 Q 开关 YAG 激光器的测试纸带。它显示了开机以后,随着热过程达到平衡,输出趋于稳定的过程。稳定时平均值变化很小,标准差几乎不变。百分稳定度小于 3%。这台激光器是相当不错的了。表 III 是一台美国 Quanta-Ray 公司的 YAG 泵浦可调谐染料激光器的测试结果。这是经过振荡、放大、倍频、染料各级以后的最终输出结果。测试找到振荡级在较大的输入条件下有较好的结果,稳定度可小于 4%,也算很好的了。

该装置操作简便,测量结果可靠,经过一年多的使用,已于 1984 年 12 月由国内同行通过

鉴定。

表 I

496	84
516	60
508	87
505	99
512	63
484	,
490	,
502	55
501	90
490	,
502	99
501	85
509	63
516	86
500	99
499	,
514	54
498	98
501	,
509	99
526	40
500	82
499	67
507	73
445	,
510	80
505	85

表 II

334	30
335	31
318	34
320	32
320	36
319	35
322	35
326	31
333	32
334	31
335	24
329	35
330	34
332	33
332	33
331	35
233	32
335	27
336	29
337	28
341	19
343	9
343	9
343	9
344	9
344	9
344	9
345	9
340	10
341	9
342	9

表 III

531	21
531	20
527	20
529	19
531	20
529	19
527	20
530	20
529	19
530	19
528	19
527	19
527	21
527	19
526	20
527	19
527	20
526	19
527	21
528	19

参考文献

- [1] 孙云龙、冷长庚,激光数字式峰值功率计,激光与红外,1979年第3期
- [2] M6800微型机系列数据手册,电子工业部 1447 所译
- [3] 1128(1976).
- [26] 孙金坛等,《应用激光》,第2卷,第4期,47(1982).
- [27] R. F. Wood, Phys. Rev. B23, 2923(1981).
- [28] R. T. Young, IEEE Trans. Electron Devices, ED-27, 807(1980).
- [29] J. A. Muir, IEEE Trans. Electron Devices, ED-27, 815(1980).
- [30] H. Fisher, IEEE Trans. Electron Devices, ED-24, 438(1977).
- [31] Annual Rev. of energy, V. 3, p. 477-517 (1978).
- [32] Energy Future, Industry and the new technology, 79-123, Solar cells, (1977).
- [33] Nature, 207, 111-117, (1977).

(上接第17页)

- [18] J. C. Irvin, Bell Syst. Tech, J. 41 387(1962).
- [19] I. A. Weinlery, Appl Phys Lett, Vol. 39, № 5 421(1981).
- [20] W. G. Hawkins, Appl Phys Lett, Vol. 40, № 4, 319(1982).
- [21] Y. Akasaka, Solid State Technology, Vol. 24, № 6, 88(1981).
- [22] 林成鲁等,《上海半导体》,第4期,8(1983).
- [23] T. M. Fairfield, Solid-state Electron, Vol. 11, 1175(1968).
- [24] T. Narayan, Appl. Phys. Lett, Vol. 33, 338(1978).
- [25] G. A. Kachurin, Soviet phys-semicond, Vol. 10,