

硅太阳电池和光发电

陆 鸣

(浙江大学无线电系)

1954年4月26日,在华盛顿召开的美国科学院年会上, D. M. Chapin, C. S. Fuller 和 G. L. Pearson 联名作了一项振奋人心的技术报告,很快引起了全世界的注意. 同年5月,美国《应用物理》杂志以“一种将太阳辐射转换成电能的新颖硅 p-n 结光电池”为题,发表了他们的报告. 这篇报告详尽地介绍了大面积硅太阳电池的制作方法和性能, 电池的光电转换效率是 6%^[1]. 现在看来这一数值显然不高,可是与 1953年以前能把阳光直接转换成电能的硒光电池相比,增长了 7.5 倍.

当时,硅太阳电池的结构如图 1 所示,正、负电极均制在底面,整个顶面都被利用. 存在的问题是 P 型硼扩散薄层的电阻损耗很大. 增加 P 型薄层的厚度,虽说能使这种损耗减小,但电池对短波长光的响应却也随之减小. 两者之间的协调关系直到 1957 年才弄清楚^[2].

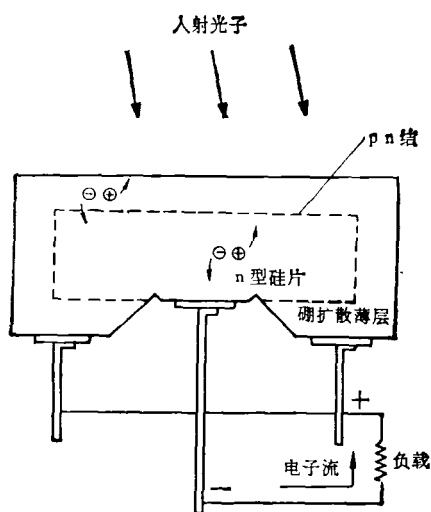


图 1 早期的太阳电池

Chapin 三人的报告发表后,人们对太阳电池的研究相当活跃. 许多学者从理论上探讨了决定太阳电池效率的诸因素. 譬如, J. J. Wysocki 和 P. Rappaport 研究了制作电池用的各种半导体材料的理论效率在不同晶格温度下与禁带宽度 E_g 的关系^[3]. 一般的结论是, E_g 为 1.45eV 的砷化镓电池的效率要比 E_g 为 1.02eV 的硅电池高 1.23 倍. W. Shockley 和 H. J. Queisser 用“精细平衡极限法”计算 p-n 结太阳电池的效率^[4], 得到了与 Wysocki 和 Rappaport 基本相同的结果. L. M. Terman 计算并测量了太阳辐射在不同大气质量条件下的光谱和太阳电池结构的光谱响应之后证明, 要增加电池对长波长光的响应, p-n 结必须做在表面下方较深的地方; 要增加短波长光的响应, p-n 结则应做得更靠近表面; 如果电池表面的复合速度很高, 表面附近的载流子寿命便减小, 对短波长光的响应也会减小, 从而对电池的效率产生显著影响^[5]. 这个时候的 J. J. Wysocki^[3], H. J. Queisser^[4] 和早些时候的 R. J. Handy^[6] 先后研究了太阳电池结构中耗尽区的复合电流若在电池的正向电流中占优势的话, 电池的效率将会明显下降, 而当电池材料含有晶格缺陷或由制造工艺而引进缺陷的话, 这些缺陷又会使电池的效率进一步减小. 此外, 电池结构的串联电阻对太阳能转换可能达到的最大效率提出了另一种限制. 实验和理论都表明, 串联电阻只要有 5Ω 便能使电池的输出功率减到最佳输出功率的 30% 以下, 也就是说在其他条件相同的情况下, 由于串联电阻的影响, 最佳电池效率至少要下降 30%. 太阳电池的串联电阻主要依赖于 p-n 结的结深、P 型区和 n 型区的杂质

浓度以及电池电极的欧姆接触。所以,太阳电池的实际效率只有全面综合了电池材料的性质、不同大气质量条件下太阳辐射的光谱分布、电池的光谱响应以及电池的具体结构、制造工艺等种种因素之后才能正确求得。从这个意义上讲,尽管按材料性质言,硅并不是制造太阳电池的最佳材料,室温下效率最佳的材料是砷化镓,但目前有实际应用价值的电池却都是硅材料制成的,它们的效率一般可以达到或略超过10%,至今还没有一种非硅材料制成的实用电池能比硅电池的效率更高。这是因为硅电池的结构和制造工艺都比较成熟,而且据资料分析,若干年后实用太阳电池大概仍将以硅器件为主。

正是在上述研究的基础上,1958年3月17日美国发射了第一颗采用硅太阳电池作无线电发射机电源的轨道空间卫星先锋一号(Vanguard-1),卫星上的这些硅电池大约工作了八年之久。从此,太阳电池工业在空间规划的激励下迅速形成和发展了起来。应该指出在硅电池的效率达到10%之后,硅电池的抗辐射性能及相关问题便成了一个急待解决的课题,因为当时通讯卫星的研制已经开始,而要将通讯卫星发射到同步轨道上去的话,势必经过地球大气层外含高能强中子流的所谓Van Allen辐射带,这对卫星使用的硅太阳电池无疑会造成严重损伤。为此,美国贝尔实验室和空间技术实验室联合组成了一个小组,把各种结构的太阳电池置于能量范围从几兆电子伏到高于几百兆电子伏的回旋加速器和同步回旋加速器的轰击之下,考察和研究了中子辐射对太阳电池的短路电流、最大输出功率、结的特性和光谱响应等重要参数的影响^[7]。由于n型半导体和p型半导体材料的辐射损伤机理本质上有差别,所以如果n⁺/p和p⁺/n电池的短路电流:最大输出功率和少数载流子扩散长度因辐射而造成的损伤效果相同的话,两者所需的辐射剂量却不同。以短路电流、最大输出功率和少数载流子扩散长度为例,n⁺/p电池所需辐射剂量约分别是p⁺/n电池的7、9.5和72倍。可见n⁺/p电

池的抗辐射性能优于p⁺/n电池。这个小组还定量地解释了由于辐射后体内少数载流子扩散长度减小所造成的电池长波长转换效率的衰退。因为电池顶部薄层内的表面复合速度并不因辐射而显著变化,所以辐射对短波长光转换效率的影响相对地小。这些结论告诉我们,只要在P型硅片上制备良好表面特性的超薄n⁺扩散层,并精心设计抗反射敷层制造出一种吸收短波长光的蓝光电池的话,那么电池的抗辐射强度和转换效率定会有进一步的增进。1962年7月10日凌晨,美国发射的Telstar通讯卫星最先采用了这种改进的n⁺/p型电池。此后凡空间应用的太阳电池,全部都是这种结构的电池。

在空间应用的基础上,利用硅电池构建陆上发电站的尝试逐渐受到人们的重视。原因是硅电池陆上应用的成本比之空间应用至少可以低100倍。目前,空间应用的成本每瓦起码要300美元;陆上应用已低达每瓦20美元。使陆上应用的成本再削减10倍,当然是向工业提出的新挑战,该目标一旦实现,可以推测陆上应用电池的需要量将会一下子增加许多倍^[8]。毫无疑问,提高太阳电池的效率,对实现上述目标仍很重要。人们公认,浅结、密栅、绒面、背场和好的抗反射敷层是提高电池效率的重要措施。例如,一种扩散层只有0.25 μm ,涂敷Ta₂O₅抗反射膜的紫光电池,短波长光的吸收率相当高。进一步改善电池的反射系数使其趋于零,即所谓的黑光电池,在外层空间的效率约可增到15%。同样的电池,如果在陆上应用,由于大气吸收和散射的作用以及大气质量的不同,转换效率可达17—18%。因此,近年来,世界各国都在开展太阳能光发电的研究。美国自1972年起,就在国家科学基金会和宇航局的资助下着手制订太阳能光发电的规划,此规划后来移交给能源部具体管理^[9]。它按近期、中期和远期分别对太阳电池的阵列成本、年发电容量和每千瓦小时电力的成本作了具体规划。据称按该规划太阳电池的发电装置在1986年便可投入市场,1990年将分担电力供给,2000年达全国

总发电容量的 20%。美国能源部还表示,1986 年实现硅太阳电池生产自动化,1984 年前后增加薄膜太阳电池等革新技术。对此,美国政府在 1979 年已投资一亿三百五十万美元,预计今后十年内将再投入约十五亿美元。

日本通产省也在 1974 年开始执行一项称为“向阳计划”(サンシャイン計画)的太阳能开发规划^[10]。1980 年决定加速推进实施。规划预计在 1995 年光伏发电容量达全国总电力的 1%。1980 年太阳电池光发电的总容量虽然不大,仅约 400kW,但 1980—1990 年计划按每年 100% 的速率,1991—2000 年按每年 20% 的速率增长,2000 年时便可达到 3×10^6 kW,约为现有规模的一万倍^[11]。

欧洲经济共同体各国,1979 年以来对太阳能光发电的投资已有 2400 万美元,其中九国预定 1983 年将建造 300—400kW 的低成本太阳电池发电系统 3 或 4 套。

但是,硅太阳电池为适于陆上应用,必须同时满足效率高、成本低和生产率高三方面要求,这的确还存在一定的困难。其中最大的障碍是成本。仍以美国为例,如果光发电的总成本是每瓦壹美元,按目前美国约 3×10^{11} W 总发电容量的 20% 计,所需费用就得一千亿美元。美国 1978 年国民经济的总产值是二万亿美元。美国拥有 75 万名雇员的最大企业通用汽车公司 (General Motors Corporation) 平均年总收益是四百亿。现在实际上组成美国经济基础的企业大多数年收益仅几十亿美元,雇员少于一千名。凭此要实现光发电替代全国总电力 20% 的目标,即使比 2000 年再迟十年,无论是资本、劳力,还是国家权力机构的决策、胆识都值得考虑^[12]。所以 J. J. Loferski 在 1981 年美国第 15 届光伏打专家会议上曾表示美国政府和法国政府对光伏打研究的支持已有下降的看法^[13]。

我们不准备评述国外对光发电的官方态度,单从技术角度而言,为了大幅度降低成本,美国能源部就专门成立了六个研究部门来从事低成本硅电池、新材料及新型电池的研究和系统应用、电力调整与蓄贮等方面的研究。譬如

他们组织了十一家公司和大学来研究从根本上消除硅片切、磨、抛加工费用的大面积片状和带状硅的生长技术,动员了四十所高等学校和公司探讨低成本电池的制造、自动化生产以及大批量生产的方法。至于新材料的研究则包括象 CdTe, Zn₃P₂, CuInSe₂, ZnSiAs₂ 及 III-V 族元素等直接跃迁型半导体和在单晶硅上制备 In₂O₃, SnO₂, Sb₂O₃ 膜构成异质结等课题。日本向阳计划中,关于太阳电池发电技术的项目(详见文献[10])也反映了这方面的研究动向。这里特别值得一提的是在钢或玻璃衬底上沉积非晶态硅膜制作非晶太阳电池的工作^[14,15]。非晶态硅,也称非晶态硅-氢合金 (α -Si:H),具有比晶态硅大的光吸收系数和更宽的禁带以及良好的掺杂特性,非晶态硅电池的开路电压值也大于普通硅电池,而且除了这些物理上和材料结构上固有的优点外,它还具有能以较省的原料和较简单的工艺制造大面积电池,也适合于连续自动化生产的特点,对大幅度降低成本,提高生产率,促进太阳能光发电的陆上应用是有积极意义的^[15],只是非晶硅电池中少数载流子的收集问题尚需进一步改善,以使其效率能从现有 6% 的基础上有所提高。

当然,实施太阳能光发电的途径多种多样,譬如一种考虑是把热和光伏打效应组合起来发电的混合型太阳能光发电方案,就是利用聚光系统中太阳电池阵列的冷却回路造成温差并靠温差电动势效应 (Seebeck effect) 产生电,也可以利用聚集的阳光加热某种特殊的金属物质,并由这种热质向太阳电池辐射红外电磁能而发电^[11,12]。又如为了避免太阳电池在夜间或阴雨季季节几乎不能发电的致命弱点,美国正在研制一种将太阳电池设施安置在同步卫星上,并把电池转换得到电能以微波方式送返地球的“宇宙太阳发电技术”。美国计划从 2000 年开始,三十年内发射 60 颗这样的卫星,60 颗卫星产生的总电力为 300000MW,相当于 2020 年美国所需电力的 12%。估计建造这些卫星发电系统的全部费用约七千五百亿美元。在这种方案中,太阳电池的电力-重量比和抗辐射性能极

为重要^[11]。

尽管如此,从现有的经济分析来看,最有效而且经济上可与采用地下燃料发电竞争的光发电方案还是利用聚光系统集中高强度光束直接照射太阳电池来发电^[16]。在该方案中,提高太阳电池的效率比降低电池成本更重要^[17],为此下面特介绍几种适合在聚光系统中应用的新颖高效率电池结构。

1. 修正型常规硅电池

常规设计的硅太阳电池^[18],只要顶面的接触略作修正(如密栅)以防止串联电阻过大,便可在聚光系统中应用。常规电池的种类很多,就基本结构而言,大约可以归纳为四种变型: n^+/p , p^+/n 以及相应的两种背场电池。 n^+/p 电池最佳的基区电阻率为 $0.3\Omega \cdot \text{cm}$, 100°C 时,在 50—100 太阳强度¹⁾下,可得最佳特性。 p^+/n 电池的开路电压一般比 n^+/p 电池高。背场电池理论上优于各种普通的 n^+/p 和 p^+/n 电池,这是因为背场电池有改善长波长光响应的能力,而且在聚光照射下的大注入效应,恰好是增大开路电压和背场电池填充因子所希望的。

2. 梳状电池

梳状电池的剖面如图 2 所示^[19]。它采用厚约 $75\sim 100\mu\text{m}$ 的高阻(约 $10\sim 10^3\Omega \cdot \text{cm}$)、长寿命(即体复合极小)硅单晶,单面交替扩散 n^+ 和 p^+ 的梳条,另一面覆盖一层既钝化表面又起抗反射敷层作用的 SiO_2 膜,最后通过金属化布线把 p^+ 和 n^+ 区并联起来,使整个结构

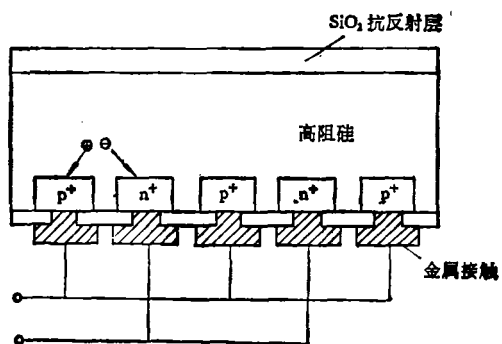


图 2 梳状电池的剖面图

犹如一只单结器件。梳状电池由于没有横向流过扩散薄层的电流,差不多完全消除了表面串联电阻造成的损耗;阳光高度聚集时的大注入电导率调制又能减小体串联电阻;顶面无栅极故不存在光学损失,它特别适合在聚光系统中应用。器件的电压输出本质上由 n^+ 和 p^+ 区决定,收集效率则由体内高阻材料决定。因结两侧的掺杂梯度很大,发射效率极高,所以输出电压比普通结构明显高。梳状电池的缺点是对表面复合的敏感程度比其他结构厉害,对材料体内寿命的要求非常高。如果电池体内寿命有几百微秒或更长,顶面的表面复合速度是 10cm/s 或更小的话,那么在 100 太阳强度下,梳状电池的固有效率约为 25%,1000 太阳强度下为 28%。

3. 垂直多结 (VMJ: vertical multijunction) 电池

垂直多结电池^[20](图 3)某些方面很象梳状电池。这两种器件的串联电阻都比普通电池小,都没有会使人射光减弱的栅极。理论上,VMJ 电池的光谱响应由于收集结垂直贯穿器件而将比任何器件都好。VMJ 电池是一种高电压输出(不是大电流输出)器件,故连成阵列的手续相当简单,从而大大减小了器件制造的总费用。

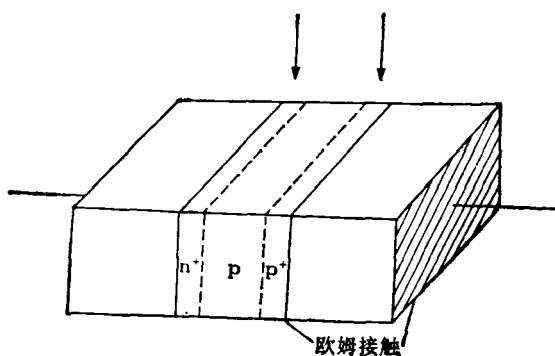


图 3 垂直多结太阳电池

VMJ 电池由若干个 n^+pp^+ 单元和单元间的欧姆金属接触串联而成。高效 VMJ 电池顶

1) 1 太阳强度 = 100 mW/cm^2 。

和底两面的表面复合速度应小,寿命应足够长,以使载流子扩散长度能比单元电池的宽度大好几倍. n^+ 和 p^+ 区以及各单元电池间的金属接触是光电流的损耗区,它们的宽度相对整个器件的宽度而言,应尽可能地缩小.

只要聚光系统采用的聚光器能沿电池长度方向产生均匀的光强, VMJ 电池将是聚光系统中效率最高的器件. 理论上其效率可以超过 30%, 不过现有的实验性器件由于工艺上的限制,离最佳状态尚远,还达不到上述理论值.

4. 横向多结 (HMJ: horizontal multijunction) 电池

横向多结电池(图 4)也是一种高电压、小电流器件^[17,21],与 VMJ 电池不同的是阳光须垂直于结面射入.

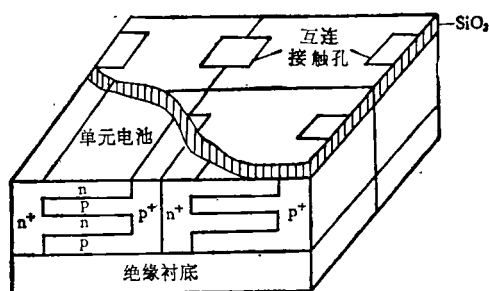


图 4 横向多结太阳能电池

HMJ 电池的主要优点是输出电压高,能在芯片上直接设计阵列. 适当调节串联起各独立单元的 p^+ 和 n^+ 区,使掺杂高得足以产生隧道效应的话,各单元电池中的多层平面结将对阳光光谱中的长、短波长都有很高的收集效率. 考虑到各单元间的电性隔离,目前硅 HMJ 电池阵列还只能先分别制成单元,然后再相继固定在绝缘衬底上,或者采用蓝宝石上外延硅膜的结构. 相比之下,采用砷化镓制作 HMJ 电池就容易多了. HMJ 电池虽说至今尚处于构思阶段,不过真正实用的器件估计很快就会问世.

5. “多色”太阳能电池

“多色”这个术语,在这里的含意是指电池设计时,把太阳光谱划分成几个波长范围(所谓

色区),在每个波长范围内,采用与之相应的最佳光伏打转换材料来实现光电转换.

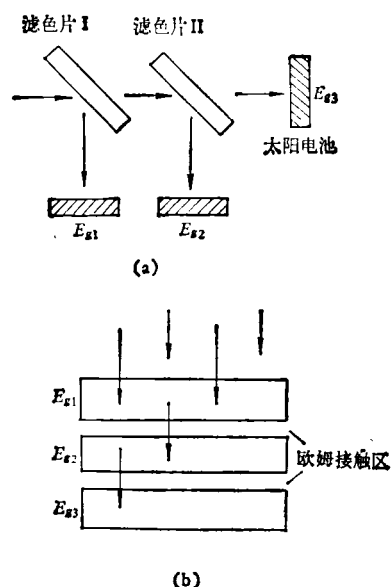


图 5 多色电池的两种模型

图 5 是多色电池的两种模型. 第一种模型^[17]采用滤色片把太阳光谱分开,每块滤色片又把某一狭带波长内的光反射到相应的电池上而让其余波长的光传递给紧挨其后的另一块滤色片. 分析表明,在 1 太阳强度下,采用这种方案的双电池系统,极限转换效率为 37%;三电池系统为 43%;在 1000 太阳强度下,分别增加到 46% 和 52%. 无论是硅还是砷化镓制成的双电池系统,聚光条件下要使效率超过 40% 是毫不困难的事. 第二种模型^[17]是由几种不同材料制成的太阳能电池,按其禁带宽度递减的次序堆叠构成. 阳光照射下,每一叠层的电池都把能量大于其禁带的光子吸收掉,而把余下的光子传递给下面的电池叠层. 为了防止叠层间光电流和光电压的损耗,连接各叠层的欧姆接触应非常良好,而且各层材料的厚度及禁带宽度必须严格按照与光电流匹配的原则来选择,除非各电池叠层都有独立的偏置和负载. 堆叠式多色电池的极限转换效率比光学滤色式电池略低,但比单结电池明显要高. 一般的双层或三

层堆叠电池,据计算,极限转换效率为35—40%,聚光条件下中心值可高于40%,实际效率约是极限值的0.70—0.75倍。

效率高是多色电池最显著的优点,如果实际效率能争取超过30%,制造时化费的经费又不过分昂贵的话,它对光电转换在陆上应用是有刺激作用的。多色电池的缺点是制造难度高,至今尚未见到报道有关多重滤色式和堆叠式电池实际工作的文献。

总之,短短的二十八年间,研究太阳能发电的热潮蓬勃兴起,经久不衰,人类利用太阳能发电的前景相当光明。

参 考 文 献

[1] D. M. Chapin, C. S. Fuller, G. L. Pearson, *J. Appl. Phys.*, **25**(1954), 676.
 [2] J. J. Loferski, *ECA Rev.*, **19**(1958), 536.
 [3] J. J. Wysocki, P. Rappaport, *J. Appl. Phys.*, **31**(1960), 571.
 [4] W. Shockley, H. J. Queisser, *J. Appl. Phys.*, **32**(1961), 510.
 [5] L. M. Terman, *Solid State Electronics*, **2**(1961),

1.
 [6] R. J. Handy, *Solid State Electronics*, **10**(1967), 765.
 [7] W. Rosenzweig, H. K. Gummel, F. M. Smits, *Bell System Tech J.* **42**(1963), 399.
 [8] F. M. Smits, *IEEE trans Electron Devices*, **23**(1976), 640.
 [9] 小柳理正,电子通信学会誌, **61**(1978), 1124.
 [10] 第四机械工部情报研究所, 电子简报, **34**-总 208 (1980).
 [11] 高桥清,电子通信学会誌, **63**(1980), 1241.
 [12] A. G. Milnes, *Semiconductor Devices and Integrated Electronic*, Van Nostrand Reinhold, New York, (1980), Ch. 12.
 [13] J. J. Loferski, *Conference Record of 15th IEEE Phot. Spec. Conf.*, (1981).
 [14] R. Williams, *物理*, **10-11** (1981), 650.
 [15] 陈光华、王印月, *物理*, **8-5** (1979), 420.
 [16] B. L. Sater, C. Goredia, *Conf. Rec. 11th IEEE Phot. Spec. Conf.*, (1975), 362.
 [17] H. J. Hovel, *IBM J. Res. Develop*, **22**(1974), 112.
 [18] 李春鸿, *物理*, **9-4** (1980), 365.
 [19] M. D. Lammart, R. J. Schwartz, *IEEE trans. Electron Devices*, **24**(1977), 337.
 [20] C. Hu, J. K. Carney, R. I. Frank, *J. Appl. Phys.*, **48**(1977), 442.
 [21] R. M. Warner, Jr., US Patent 3994012 (1976).

(上接第 673 页)

一次充气寿命和输出能量的稳定性,却大大优于后者,这在文献[3]中已有论述。

5. 容易得到 CO₂ 激光器的最佳工作气体

在实验中发现,把一定量的空气与 CO₂ 气体混合通过发生器,能够得到使 CO₂ 激光器输出最佳的工作气体。在调试 TEA CO₂ 激光器时,利用钢瓶气体得到最佳输出的条件是: N₂: CO₂ = 190 托:170 托,工作电压 54 千伏时,单次脉冲激光能量是 8.6 焦耳;若用上面同样比例的气体和电压,在炉温 900℃ 时,把 N₂ 和 CO₂ 气体混合,以 8 升/分的流量通过发生器处理后,单次脉冲激光能量是 9.3 焦耳;而在炉温

900℃ 时,使 CO₂:空气 = 1:2,以 6 升/分的流量通过发生器,在气压 360 托、工作电压 54 千伏时,得到的单次脉冲能量是 9.8 焦耳。这可能是由于空气中含有微量 H₂O 等成份,使输出效率提高。同时说明,使用发生器后,利用空气和 CO₂ 混合生成的气体,可以取代一般所需要的钢瓶 N₂ 气。

参 考 文 献

[1] 周岳亮等, *激光*, **8-2** (1981), 49.
 [2] D. S. Staik et al., *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-11** (1975), 774—778.
 [3] 周岳亮等, *激光*, **7-1** (1980), 29.

更正启事

今年第 8 期第 458 页左边第 5 行至第 6 行原文为“穿过黑点的竖线代表实验误差,连续曲线是理论计算结果^[1]”,误排成“穿过黑线的竖线是实验误差,连续曲线是实验误差^[2]”。特此更正