

在激光束的末端使用更灵敏的光电二极管

L. A. D'Asaro, L. K. Anderson

在通讯和高速数据处理系统中引入光电子学，引起人们去寻找用微波信号调制的光束的超灵敏探测器。使用由雪崩增殖获得高灵敏度的新型低噪声光电二极管，这种研究已得到发展。二极管有一个防止表面破坏的防护环，因此容许以雪崩增殖方式运转。二极管能探测加到光束上的低强度宽带信号，并能拾取非常迅速的脉冲列。现已制成锗和硅装置。

锗雪崩光电二极管看来特别有希望，因为它在 6,000~15,000 埃(0.6~1.5 微米)区域内有高的量子效率。在红外光谱的近红外区域，此种二极管的性能优于以前报道过的任何微波光电探测器。

常用的光探测器

p-n 结光电二极管是低强度微波调制光的有效探测器，不但可靠、坚固、简单，而且轻便^[1]。但将这些二极管与理想的探测器比较，便发现如果有办法提供类似于光电倍增管的内电流增益，则前者可以作得更灵敏。这种机理存在于参加 p-n 结反破坏的雪崩增殖过程中。

某些光电倍增管有上百万的电流增益，但是其较高频率容量有限，并且在近红外波长区域，其灵敏度迅速降低。

雪崩光电探测器

已经研究了用雪崩光电二极管探测特别灵敏的微波调制光。问题是：如果没有引入过度的总噪声，雪崩机理能不能供给足够的增益，最近的实验工作表明这是可能的^[2~4]。噪声的程度应低至足以使信噪比获得根本的改善，胜过用射频和微波频率处的一般光电二极管所获得的性能。雪崩增殖在 p-n 结半导体材料截面均匀出现时，就会获得最好的结果^[2~5]。

如图 1 所描述的那样，光电二极管中的雪崩机理是由吸收的光引入的。电子产生于暴露在光中的 P 型半导体材料中。然后电子被电场加速，并与价电子碰撞。如果能量传递是足够的，价电子振动发射，产生一个电子-空穴对。这样，一个电子引进第二个电子，系统中的空穴作为载流子，新的电子-空穴开始链锁反应，这种过程使载流子产生雪崩，总数由电场的大小控制，又转而受二极管的直流偏压控制。

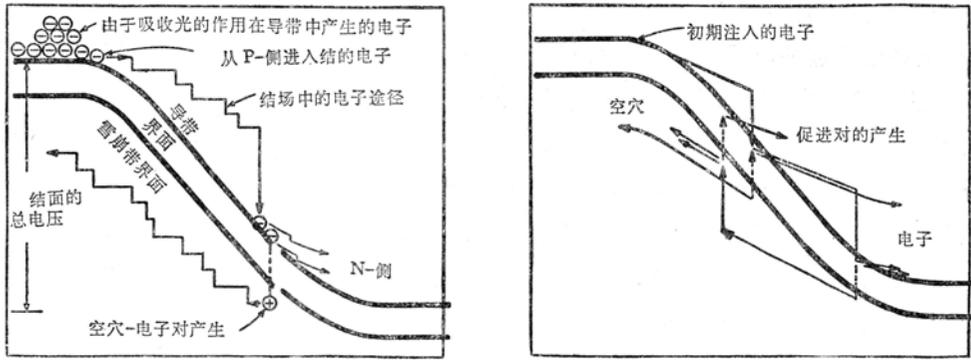


图 1 左图表示在适度反转偏压处的载流子增殖。在结的电场中运动的电子产生电子-空穴对。因此两个电荷载流子有效地横过结。锯齿形线表示载流子的扩散和偏移。右图表示在高反向偏压下的电荷增殖。为了简化表示法,以直线表示电子和空穴的运动。增殖过程又产生了许多载流子; 整个过程以加到接点上的电压控制。

微等离子体

直到最近, 雪崩增殖的功率或电流增益还是不可靠的, 这是因为与雪崩机构有关的东西不稳定。这种不稳定的东西称为微等离子体, 它是集中在某些地点的小放电区域, 其典型的直径为几微米。非常有效的载流子增殖发生在微等离子体面积上, 但这个面积太小, 不能为光电二极管提供实用的增益。微等离子体有另一个严重的缺点: 它以自发自来波动的方式产生高的电噪声。

能以图 2 中的防护环结构^[2-5]消除微等离子体。为比较起见, 也绘出了一般的台面式二极管。

在台面式二极管中, 微等离子体通常出现在结和表面的交线上。因为装置表面的电场比内部强。半导体材料相当高的介电常数使内电场降低。在雪崩二极管中, 防护环底部的电场比在装置中心 p-n 结处的弱。如图 2 中所示, 中心的结比边缘的更接近表面, 结果, 施加的电压增加时, 二极管中心部分首先达到雪崩所需的临界场强。所以雪崩过程局限在中心部分。因为雪崩区域不出现交线上, 令人讨厌的表面微等离子体也不出现。

但是某些微等离子体的确出现在半导体材料中, 有位错(晶体结构不规则)的地方最常见。对材料的小心处理有助于减少内部微等离子体的数目。如果二极管的直径限制在几密耳内, 二极管

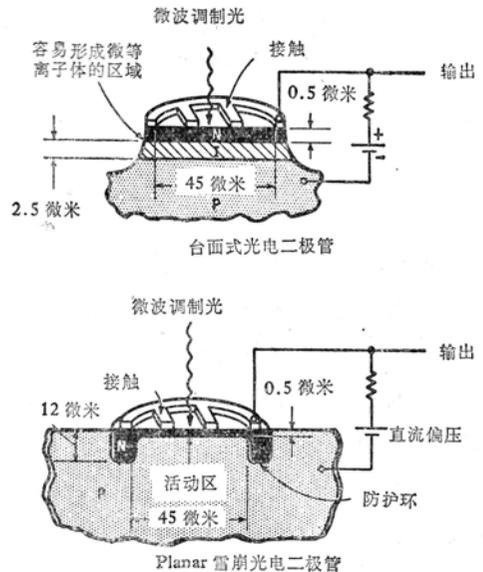


图 2 上图为高速台面式光电二极管的构造, 下图为高速雪崩光电二极管的构造。在雪崩二极管中, 雪崩增殖局限于装置的中心部分, 该处沿结方向的场最强。

又经过仔细选择,则微等离子体游离的二极管可由商品硅和锗制成。对于与探测空间相干光(如从激光器或很远的光源发射的那样)有关的应用说来,如此小面积的二极管常常是非常适宜的。大的无微等离子体的二极管也能以无位错的硅生产^[6]。

可用观察雪崩过程中释放的电子与空穴复合产生的电致发光来核对雪崩破坏的均匀性。这种发光的空间分布符合于空穴-电子等离子体的密度,因此也符合于电场的分布。图3右边的照片表示硅防护环二极管的发光;左边的照片也示出了二极管在普通光中的状态。右边的照片还示出了等离子体不出现的情况,因为它们会以亮斑出现,如果不出现亮斑,则可假定二极管的雪崩均匀地发生在中心的全部面积上。

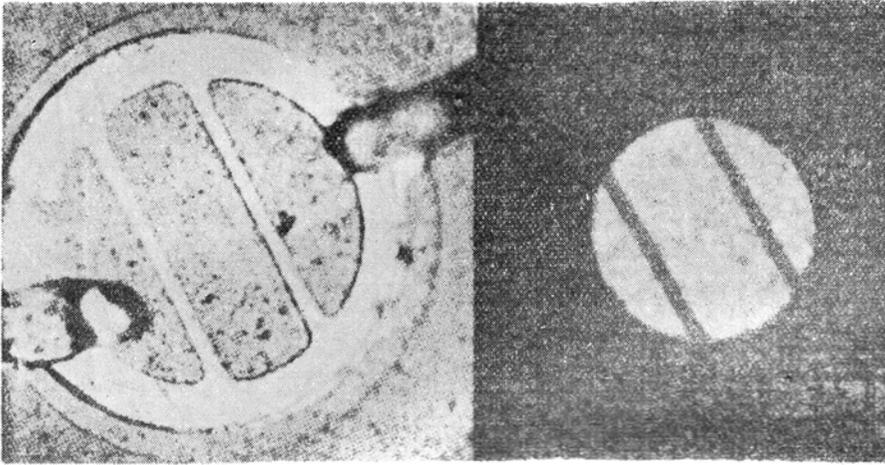


图3 左边是用显微镜观察的防护环雪崩光电二极管。通过两根热压带金丝和一块铝接点实现接触。横过中部的两个片减少串联电阻,改进高频反响。右边的照片表示在15毫安的换向偏压电流和超过30伏的破坏电压的换向电压下,同一二极管中心区的电致发光。

测 量

当将二极管用作光电探测器时,以一面透镜将光集中在激活中心部分。光在结的附近产生空穴和电子,并使换向电流增加。对于非雪崩二极管说来,这种换向电流几乎与电压无关,但是在增殖存在的情况下,达到破坏电压时,换向电流迅速增加。锗雪崩光电二极管典型的破坏特性示于图4。每条曲线为不同值的入射光强的结果,与二极管低偏压值(如1伏)流动时的光电流(I_p)一致。用1伏偏压时,没有增殖或者是增殖很小。任何高偏压下的电流流动与在低偏压下的电流流动的比率确定了高压电下的增殖。交流功率增益约与增殖的平方成正比,直达到饱和极限效率为止。

要探测以微波调制的光,部件的寄生电抗必须减到最少。这可用图5中的连接器装置与共轴组件来实现。图6示出了装在这个部件中的锗二极管的性能曲线。激励光在1.15微米的近红外波段;其强度在3千兆赫处调制到约3%的深度。平均的直流电正比于直流增殖。信号中最大的增益约为30分贝。对于低值的增殖,噪声完全来自放大器级。增殖增加时,主

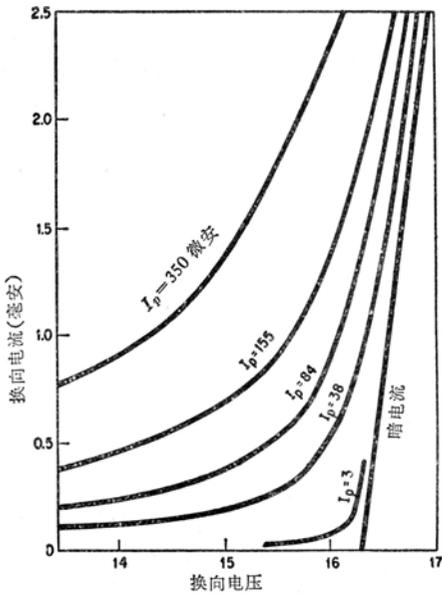


图 4 锗雪崩光电二极管的破坏特性。图示用各种光强产生的不同的光电流值(I_p)。暗电流破坏电压为 16.3 伏。

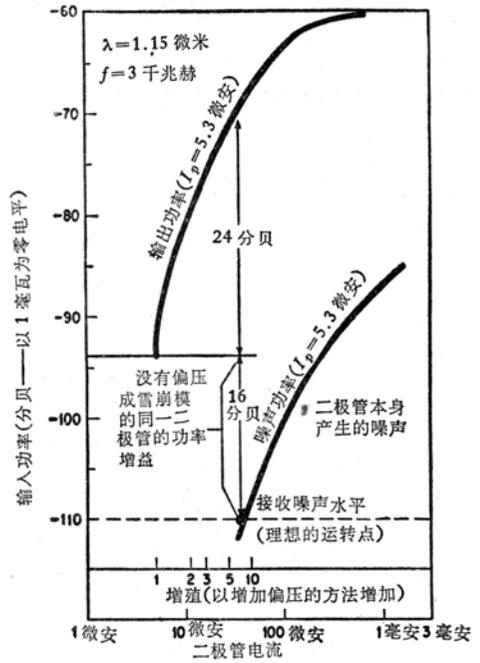


图 6 在 1.15 微米处，以 3 千兆赫调制的激光激励时，锗雪崩光电二极管产生的噪声和交流输出功率。光产生 5.3 微安的原光电流。增殖和二二极管的输出功率水平可用增加偏压电流的方法增加；然而这也增加了输出信号的噪声成分。

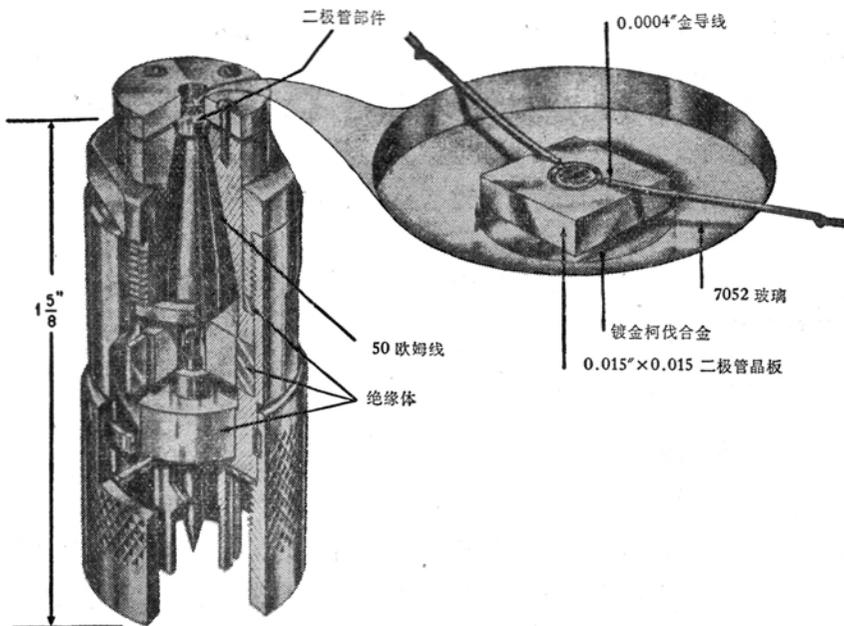


图 5 为光探测器设计出具有低寄生电抗的共轴部件。锥形中心导体供给发射线和二极管组件间的阻抗匹配。这个组件中探测器的性能示于图 6。

要的噪声源变成与二极管电流有关的放大散粒效应噪声。在接收器噪声中以散粒效应噪声为主的运转区，总噪声比信号增加得快。因此，仅用足够的增殖使散粒效应噪声达到接收器噪声水平的方法而获得最佳的信噪比。在给出的例子中，增殖为 7 时，获得 40 分贝的最大信噪比。较在低偏压电下运转的同一二极管约改进 24 分贝。在这个改进中，有 17 分贝由雪崩增殖引起，余下的 7 分贝则归因于二极管中由增加偏压而引起的其他变化。

在任何给定的频率处能获得的最大增殖依赖于雪崩过程的特性时间。象大多数增益机构一样，雪崩增益可用增益-带宽乘积表其特征。特殊的硅光电二极管的特性时间为 1.4×10^{-12} 秒，相当于 100 千兆赫的增益-带宽积。在微波频率区，最大功率增益对频率的依赖关系示于图 7。在低频处，增益-带宽积所预示出的巨大增益受到饱和效应的限制。然而，在声频区，直至 10^6 的增殖可用硅二极管测量到，以探测很弱的光。

除用作微波调制光的探测器外，雪崩光电二极管还能探测很短的光脉冲。在这种应用中，锗光电二极管在 6.328 埃处的上升和下降时间少于 0.25 毫微秒。

锗二极管对于近红外区域的探测特别有用。它有效响应长达 1.6 微米的波长，而光电倍增管在这个波长处的响应则很少有。锗雪崩光电二极管对光电倍增管中光阴极的优越性示于图 8。这些曲线中，将量子效应——每个入射光子产生的起始光载流子的数目——绘为照明辐射波长的函数。在红外区域，光阴极的量子效应如此低，以致用了大的第二次发射电流增益，光电倍增管的灵敏度依然低于锗雪崩光电二极管。

光明的前途

新型雪崩光电二极管可用来解调加到光束上的宽带宽的微波信号，或探测非常迅速的光脉冲列。其他可能的应用为在光耦合电路中，或在需要灵敏探测器的红外研究中。它的性能好、体积小、构造坚固、电源要求适度而且寿命长，这将使它广泛应用在低强度光的探测中。

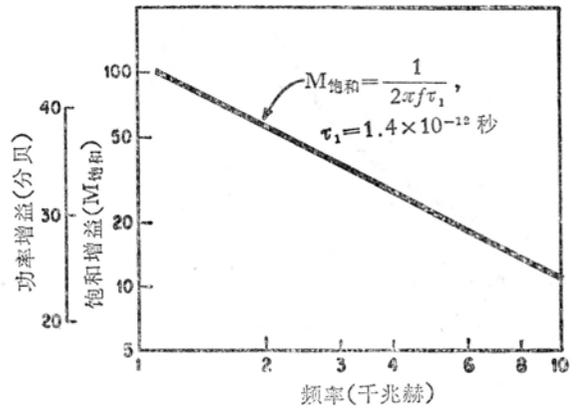


图 7 饱和增殖和功率增益随硅雪崩光电二极管的频率线性地改变。二极管的增益-带宽积为 100 千兆赫。

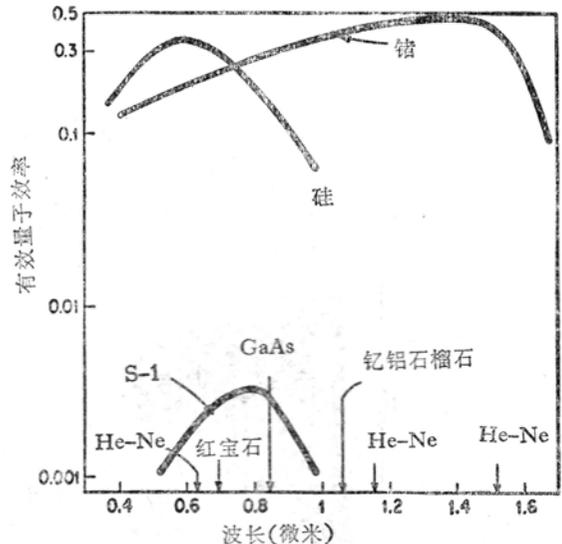


图 8 硅和锗雪崩光电二极管的量子效率与用在光电倍增管中的 S-1 光阴极的效率的比较。也指出了各种激光的发射波长。

参 考 文 献

- [1] L. K. Anderson, "Photodiode Detection," *Proceedings of the Symposium on Optical Masers*, Polytechnic Press, New York, 1963, pp. 549-563.
- [2] L. K. Anderson, P. G. McMullin, L. A. D'Asaro and A. Goetzberger, "Microwave Photodiodes Exhibiting Microplasma-Free Carrier Multiplication," *Applied Physics Letters*, Vol. 6, Feb., 1965, pp. 62-64.
- [3] K. M. Johnson, "High-Speed Photodiode Signal Enhancement at Avalanche Breakdown Voltage," *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. ED-12, Feb., 1965, pp. 55-63.
- [4] G. Lucovsky and R. B. Emmons, "Avalanche Multiplication in InAs Photodiodes," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 53, Feb., 1965, p. 180.
- [5] H. Melchior and W. T. Lynch, "Signal and Noise Response of High Speed Germanium Avalanche Photodiodes," to be published.
- [6] R. L. Batdorf, A. G. Chynoweth, G. C. Dacey and P. W. Foy, "Uniform Silicon p-n Junctions. I. Broad Area Breakdown," *Journal of Applied Physics*, Vol. 31, July, 1960, pp. 1153-1160.
- [7] A. Goetzberger, B. McDonald, R. H. Haitz and R. N. Scarlett, "Avalanche Effects in Silicon P-N Junctions. II. Structurally Perfect Junctions," *Journal of Applied Physics*, Vol. 34, June, 1963, pp. 1591-1600.

原载 *Electronics*, 1966, 39, № 11, 94~98 (周碧秀译, 王克武校)

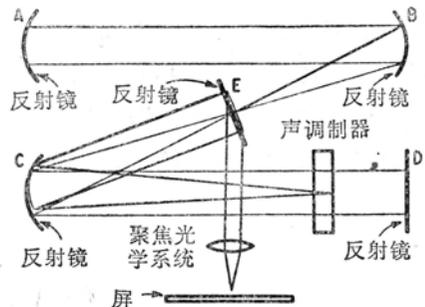
声致激光偏转器

在激光束应用于电视状的显示装置之前,首先要使它象电子束在电视屏上扫描一样进行扫描。美国通用电话和电子学公司实验室的一个研究组已经发明了一种新方法:用声脉冲来使激光束扫描。

这一方法的发明者福勒(V. J. Fowler)和科恩(E. S. Kohn)说,扫描是借助于透明石英延迟线获得的。在线中引入超声波脉冲。这些脉冲(每一脉冲的宽度为0.13毫米)沿着线运动,在脉冲运动地点引起折射率的局部变化。因此,进入石英延迟线的脉冲光束,在离开时就会改变自己的方向,产生一系列运动的扇状光束。

到目前为止,他们获得了二十个清晰的光点,但他们还没有发现要获得1,000个光点以保证扫描有什么原则上的困难。

怎样保证光束扫描,这一问题不是研究者碰到的唯一难题。研究者碰到的另一难题是如何把激光束(并非不能起扫描作用的那一部分)从共振腔中引到所需的方向上。为了达到这一目的,研究者们用五个反射镜组成了共振腔(见图)。从图中可以看出,由氦-氖激光器发射



激光共振腔装置。在这一装置中,为了使激光束扫描,采用了声脉冲。这一技术可以在电视状显示系统中获得应用。