

表面复合速度对于锗的光电导 光谱分布的影响(一)*

湯 定 元 高 國 裕

(中国科学院应用物理研究所)

以不同波长的光分别照射半导体时,虽然各入射光的能量都相等,但所能产生的光电导却因波长而异。也就是说,以光电导对波长所作的图线——即光电导光谱分布——并不是一条与波长轴相平行的直线,而是一条有一定形状的曲线。事实上,半导体的光电导光谱分布一般都有一个峰值,位于该半导体的本征吸收带的长波限附近;光电导自峰值向长波方面迅速下降,向短波方面也有某种程度的下降。

光电导在长波限之外的下降,毫无疑问,是由于样品所吸收的光子数的减少所致。至于光电导在短波方面的下降,根据过去的一些研究工作^[1-5](主要是以CdS为对象),可以认为是由于样品的表面状态所促成的。但是对于表面状态如何促成这一下降的问题,至今还没有一个具体的机构。

对于锗的光电导光谱分布,过去尚无详细的研究。但是从我们对于锗的非平衡载流子在表面的复合过程的認識,不难猜想,表面复合速度应对光电导的大小起一定的作用。因为吸收系数愈大时,光生载流子的产生愈接近表面,因表面复合而消失的载流子就愈多,亦就是所能引起的光电导就愈小。因此,表面复合的存在就应当影响到光电导的光谱分布。

本文的目的即在于研究表面复合速度对光电导光谱分布的影响,并由此导出一种测量表面复合速度的方法。

实 验

我们采用交流法测量光电导,其原理如图 1

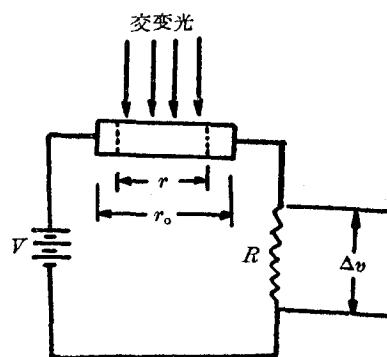


图 1. 测量光电导的示意图

* 1957 年 5 月 17 日收到

所示¹⁾。入射光穿过转动齿轮的缺口后变成矩形脉冲光照射到样品上。在脉冲光的照射时期内,光强度 I_0 不变,其照射时间远大于样品的光电导的弛豫时间,因而在光照的时间内,光电导能达到稳定状态。

V 是直流电源的电压,通过串联电阻 R 作用于样品以供测量电阻所需的电流。设样品的无照电阻为 r_0 ,受光照的部分的电阻为 r ,受到光照后, r 变成 $r - \Delta r$ 。因此电路中的电流从 $\frac{V}{R+r_0}$ 变到 $\frac{V}{R+r_0-\Delta r}$,在对称的脉冲光的作用下,这一交变电流在电阻 R 的两端产生一交变电压,如果 $\Delta r \ll r$,则这一交变电压的峰值 Δv 为:

$$\Delta v = \frac{RV}{(R+r_0)^2} \Delta r. \quad (1)$$

因为

$$r = \frac{1}{\sigma} \frac{l}{A},$$

其中 A 为样品的截面积; l 为样品受光照部分的长度; σ 为样品在黑暗中的电导率。光电导

$$\Delta \sigma = -\frac{l}{A} \frac{\Delta r}{r^2},$$

所以

$$\Delta \sigma = -\frac{l}{A} \left(\frac{R+r_0}{r} \right)^2 \frac{1}{RV} \Delta v. \quad (2)$$

对于一定的样品和一定的实验布置,测量了交变电压 Δv 就能算出光电导 $\Delta \sigma$ 。在我们的实验中,只需要知道 $\Delta \sigma$ 的相对值,所以我们就以 Δv 来代表光电导的大小,不必知道(2)式中的其他参数。

实际所用的设备如图2。 MC 是 Zeiss 反射单色光仪,配有玻璃稜镜,它在 1.0μ 处的色散约为 $0.08 \mu/\text{mm}$; 在 1.5μ 处为 $0.14 \mu/\text{mm}$ 。在我们的实验中,单色光仪的进光缝和出光缝一般都用 $0.3-0.5 \text{ mm}$ 。 S 为白炽灯光源,用蓄电池供电,以保证光源的稳定。

从单色光仪射出来的单色光束穿过一个转动齿轮 D 的扇形缺口变成矩形脉冲光。带动齿轮的电动机必须保持恒定的转速,以保证脉冲光的交变频率恒定不变。我们采用的频率是 230 周/秒。

交变光束经过透镜 L 聚光后照射到样品的中部。必须把样品的两电极盖好,免除光的照射,以消除接触层的光生电动势的影响。 M 是半透明的反射镜,使一部分光反射到温差电偶 T 上。利用这一装置可以在测量光电流的同时读出光的强度。由于我们只需要知道光的相对强度,并不需要知道反射镜 M 的反射率。交变光照的时间虽然短于温差电偶的弛豫时间,但对于相对光强的测量并没有关系。

1) 这一实验设备是殷士端和孔光临两位同志建立的,作者向她们表示谢意。

实验证明：只要光源的电流在每次实验中都保持同一值，光源的能量分布总是一样的。所以，光源的能量分布一经测定后，就能每次应用，不必每次都同时测量光电导和光强。事实上，除掉在测量光电导与光强的关系的实验中必须同时测量光强外，在一般实验中，我们都只测量光电流。这样取消了 M 后在样品上可以得到较强的照度。

圖 2 中的 R 是串联电阻，它的值应远大于样品的电阻 r ，以便得到最有利的交变信号。在我们的实验中， r 约在 $200-300\Omega$ 之間， $R=50,000\Omega$ 。选择适当的外加电压 V ，使通过样品的無照电流约为 10ma 。这一电流值的选择是为了得到足够测量的交变信号。由于我们所测的是定态的光电流，样品所受的电压虽然较大，并不会引起严重的误差。

串联电阻 R 兩端的交变电压經选频放大器 A 放大后用真空管伏特計 VT 讀出。放大器 A 在 $220-250$ 周/秒之間具有相同的放大系数，約为 1000 。实验校正表明：在我们的测量范围内，这一放大器具有直綫性的放大系数。

样品：我們所用的都是 n 型鍺單晶¹⁾。其电阻率約在 $10-20\Omega\cdot\text{cm}$ 之間。在这样純度的样品中，自由电子的濃度比空穴的濃度要大 50 倍到 80 倍，因此在計算中仍旧可以用强杂质导电的条件下的空穴的扩散系数。

样品切成長条，一般大小为 $4\times 1\times (1.5\sim 2.0)\text{mm}$ 。用砂紙磨平后，再用 Al_2O_3 粉在轉台上磨光。經冲洗后再在样品的兩端电镀一層鎳，然后鍍上电极。电镀时，可以把需要被电极盖沒的一端浸在电镀液中，这样可以使样品末端的各面都得到同样程度的电极鍍盖，也就是得到一个均匀的电极，因而可以保持样品中得到均匀的电場。这样作成的电极是欧姆接触，完全沒有注射作用。

做好电极的样品就可以进行测量，这就是后面所說的磨光的样品。为了改变它的表面复合速度，把样品浸在加热到 $60-70^\circ\text{C}$ 的 H_2O_2 中腐蝕 $5-7$ 分鐘，用蒸餾水冲洗

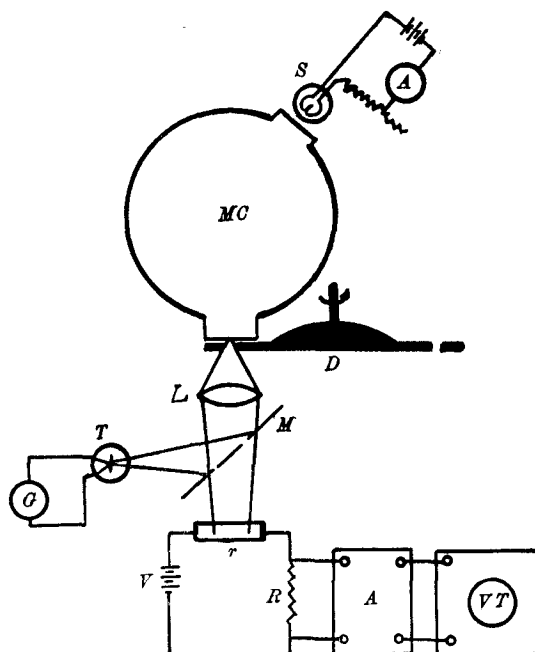


圖 2. 測量光电导光谱分布的实验布置

S —光源； MC —單色光仪； D —帶缺齿的轉盤； L —聚光鏡； M —半透明反射鏡； r —样品； A —选頻放大器； VT —真空管电压表； T —温差电偶； G —电流計

1) 鍺單晶是苏联科学院贈予我們的。

后再进行测量,或者用磨光的样品先进行腐蚀,而后做电极进行测量。

测量结果

图3是对各种波长所作的光电导与光强度的关系的测量结果。横轴是光的相对强度,对各波长所用的单位并不一样。例如 1.7μ 所用的单位差不多是 0.8μ 的单位的7倍。从图上可以看到:对于各波长,在实验的误差范围内,光电导与光强度都成正比。因此我们可以用测得的交变电压 Δv 除以光强

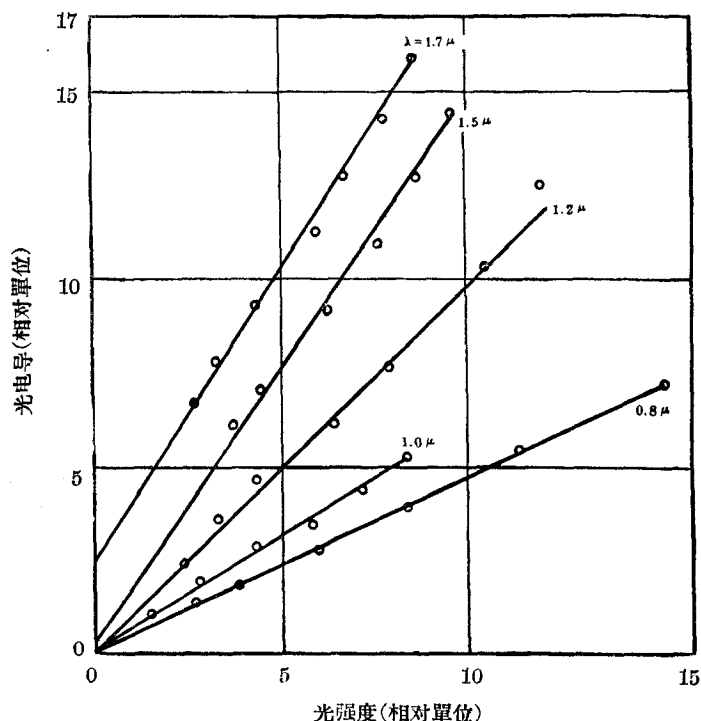


图3. 光电导与光强度的关系

来代表单位光照下的光电导,不必使各波长的入射光都变成相等的能量或量子数。

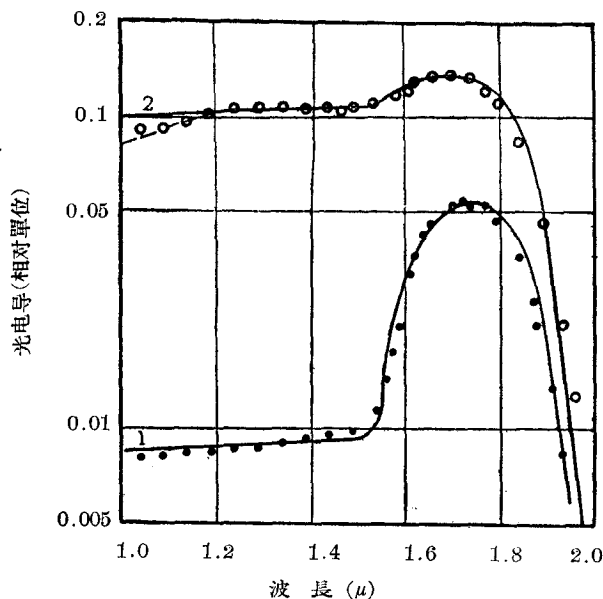


图4. n型锗的光电导的光谱分布

$n\text{-Ge } \rho=17\Omega\text{-cm}; L_p=0.6\text{mm}; l=0.9\text{mm}$
 1— $S=20,000\text{ cm/sec}$ 2— $S=1,100\text{ cm/sec}$

图3中 1.7μ 的直线并不经过原点,这可能是由于样品受到一部分散射光。因为 1.7μ 附近的光产生光电导的效率最高,所以散射光的影响在这里最容易表现出来。真正的原因我们还不很清楚。好在这一现象的存在仅仅影响到表面复合速度的测量的准确程度,对光电导的光谱分布则没有显著的影响。

图4和图5是对两个不同的样品所作的光电导光谱分布的测量结果。图中的圈或点是实验数据,实线是理论计算的结果^[6]。这一理论是以表面复合的存在为边

界条件,解載流子的連續方程所導出的結果。計算時採用了已有的吸收系数的数据^[7]和反射系数的数据^[8]。

圖 4 的曲綫 1 是磨光的样品,計算理論曲綫時所選用的表面复合速度是 $20,000 \text{ cm/sec}$ 。曲綫 2 是同一样品先腐蝕后做電極的測量結果,計算時所用的表面复合速度是 1100 cm/sec 。

圖 5 是另一个样品的結果,不过測到更短的波長。曲綫 1 是磨光的样品,其表面复合速度为 $130,000 \text{ cm/sec}$ 。曲綫 2 是同一样品在做好電極后再經過腐蝕的測量結果,因此腐蝕得比較好,它的表面复合速度是 400 cm/sec 。

在測量時我們沒有特別注意光电導在几次測量中的相对大小。这些圖中的兩条曲綫的相对高低系根据理論計算值的大小来排列的。

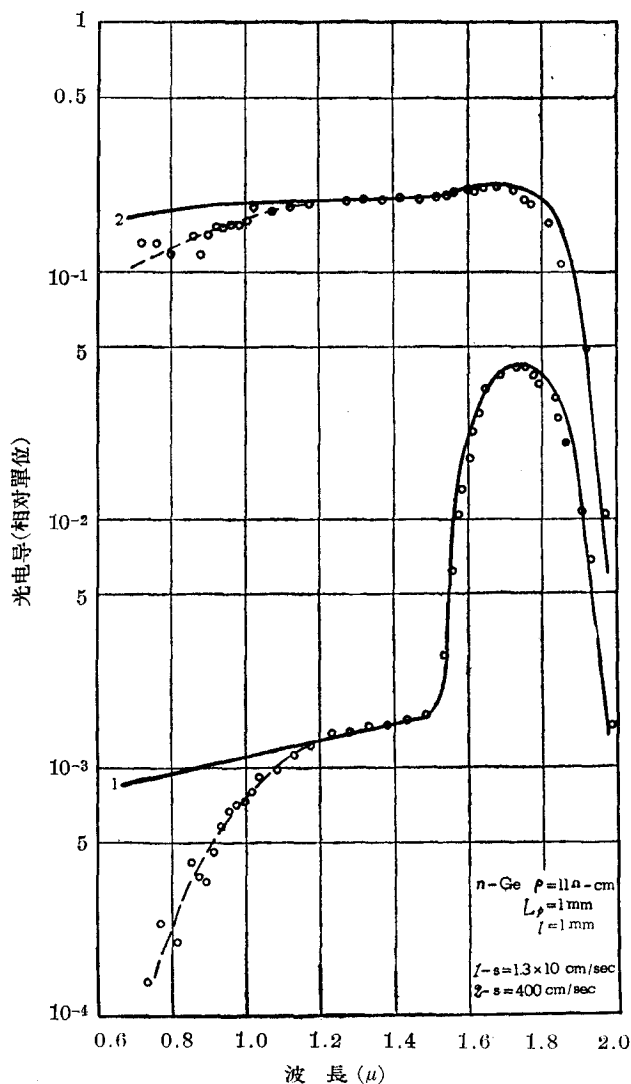


圖 5. n 型鍺的光電導的光譜分布

討 論

1. 根据理論的考虑^[6] 我們知道:在表面复合速度很大的条件下,光电導譜的長波方面有一个峰突出。这个峰的陡然升起的波長就代表直接光躍迁的禁帶寬度。由此可以求出禁帶寬度。

經過三次測量的結果,我們所得到的这一波長为 1.48μ , 1.49μ 和 1.50μ , 所以禁帶寬度平均为 0.83 eV 。三次測量的分散小于 1%。Dash 和 Newman 从吸收光譜所得的結果是 0.81 eV 。(在圖 4 和圖 5 中,我們已經把整个實驗数据向波長方面作了一个小移动,使之与理論曲綫符合,因为理論曲綫是根据 Dash 和 Newman 的吸收光譜計算

得来的。他們所得到的吸收系数的陡然下降在 1.53μ 。)

在長波方面, 光电导等于零的波長应当相当于产生間接躍迁所需的閾值能量。把我們的五条曲綫外推到光电导等于零时, 这一波長都介于 1.94μ 和 1.97μ 之間。所以間接躍迁的閾值能量平均为 0.635eV 。五次測量的分散也小于 1% 。Dash 和 Newman 的数据是 0.62eV 。

2. 根据理論分析^[6]: 光电导譜在長波方面的“峰”的形成是由于表面复合的存在所致。峰的“高度”直接联系着表面复合速度的大小。我們可以用測量“高度”的办法来决定表面复合速度。

如果我們选定峰值处某一波長 λ_1 的光电导与本征吸收帶內任一波長 λ_2 的光电导作比較, 就能得出峰的“高度” H :

$$H = \frac{(\Delta\sigma)_{\lambda_1}}{(\Delta\sigma)_{\lambda_2}} = A \frac{B + CS}{1 + ES},$$

其中 A 仅与兩波長的反射系数有关; B , C 和 E 仅与吸收系数和非平衡載流子的寿命与扩散長度有关。知道了这些参数后, 就能得出上述光电导峰的“高度”与表面复合速度 S 的关系。圖 6 就是选择 1.72μ 与 1.20μ 处的光电导相比較时具体計算出来的結果。从圖 6 可以看到: 这一方法只适用于大 S 值的測量。当 S 小于 500cm/sec 时, 这一方法不灵敏。

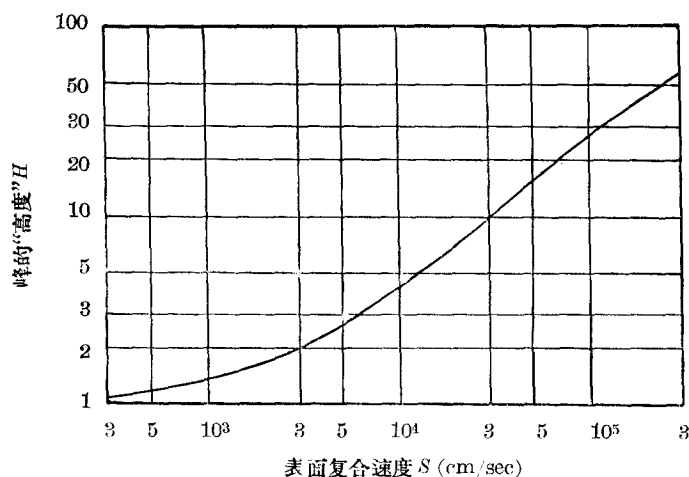


圖 6. 光电导峰的“高度”与表面复合速度的关系

在湊合圖 4 和 5 中的曲綫时, 我們就是用这一方法选定 S 的。对于磨光的样品, 由于用手磨, 每次所得的 S 值都不一样。我們所得到的最小的 S 为 $20,000\text{cm/sec}$, 最大为 $130,000\text{cm/sec}$, 这与文献上所載的結果^{[9], [10]} 相一致。对于腐蝕过的样品, 我們所得到的最低的 S 为 400cm/sec 。

3. 在圖 5 中还可以看到: 在 1.2μ 以下, 光电导的实驗值与計算值有一个明显的

分歧,这可能是由于别的复合機構存在所致^[6]。

参 考 文 献

- [1] Лашкарев, В. Е., Медведев, В. С., Скопенко, А. И., Федорус, Г. А. и Шейнман, М. К., *ДАН СССР* **86** (1952), 905.
- [2] Рыбкин, С. М. и Паряцкий, Л. Р., *ЖТФ* **24** (1954), 1.
- [3] Рыбкин, С. М., Коноваленко, В. М. и Сметанникова, Ю. С., *ЖТФ* **24** (1954), 961.
- [4] Bube, R. H., *Phys. Rev.* **83** (1951), 393.
- [5] Bube, R. H., *J. Chem. Phys.* **21** (1953), 1409.
- [6] 湯定元, *物理学报* (本期).
- [7] Dash, W. C. and Newman, R., *Phys. Rev.* **99** (1955), 1151.
- [8] Fan, H. Y. (范緒筠) and Becker, M., *Semiconducting Materials* (Henish 編), 1951, p. 132.
- [9] Shockley, W., *Electrons and Holes in Semiconductors*, 1950, p. 324.
- [10] Navon, D., Bray R. and Fan, H. Y. (范緒筠), *Proc. IRE* **40** (1952), 1342.

EFFECT OF SURFACE RECOMBINATION ON THE PHOTOCONDUCTIVE SPECTRUM OF *n*-TYPE GERMANIUM (I)

TANG TING-YUAN and KAO KUO-YU

(*Institute of Applied Physics, Academia Sinica*)

ABSTRACT

A method of measuring photoconductive spectra is described in detail, and results of measurement made on *n*-type germanium are presented. It is found that the shape of the photoconductive spectra is dependent on the surface treatment of the sample.