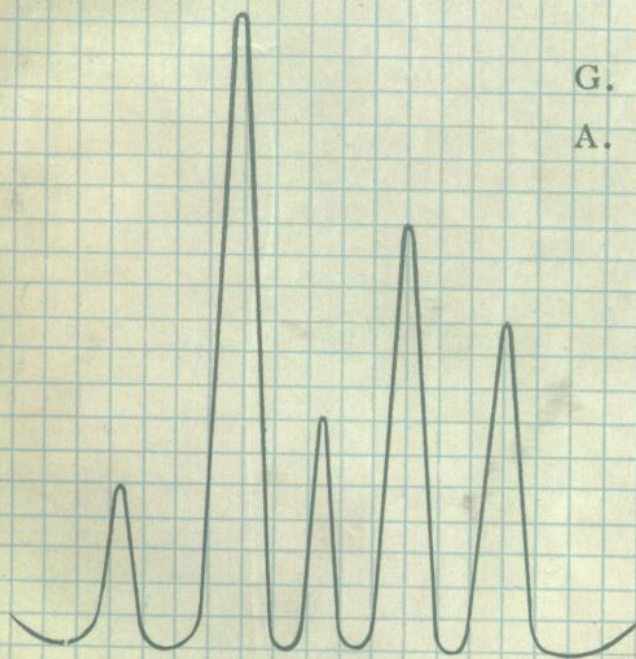


半导体探测器

G. 伯托利尼

A. 科 什



原子能出版社

半 导 体 探 测 器

G. 伯托利尼 A. 科 什 著

金 芜 谭泽祖 译

原 子 能 出 版 社

内 容 简 介

本书较全面地总结了1968年以前关于半导体探测器研究工作的成果,内容比较系统,书中列出了较多的参考文献。

全书共分五章。第一章叙述了半导体的基本性质。第二章着重讨论探测器的性能和结构。第三章介绍了关于能量测量的电子学和时间分辨率。第四章介绍了核辐射能谱学。第五章专门讨论了用于 γ 射线谱仪的半导体材料的研究。

本书可供从事半导体探测器研究和制造工作的人员,实验核物理研究人员及高等院校师生参考。

SEMICONDUCTOR

DETECTORS

G. Bertolini

A. Coche

North-Holland Publishing Company-

Amsterdam 1968

半导体探测器

金 芃 谭泽祖 译

原子能出版社出版

张家口地区印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

★

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ · 印张 $15\frac{1}{8}$ · 字数 400 千字

1975年2月北京第一版·1975年2月第一次印刷

印数 001—4400 · 定价: 2.20 元

统一书号: 15175·026

目 录

前言	1
绪言	3
参考文献	9
第一章 半导体的基本性质	11
1.1. 硅和锗的半导体性质	11
1.1.1. 禁带宽度	11
1.1.2. 本征性质	12
1.1.3. 非本征性质	15
1.1.4. 晶格的结构缺陷	19
1.1.5. 载流子寿命	21
1.1.6. 复合和俘获	22
1.1.7. 半导体辐射探测器中的有效载流子寿命	24
参考文献	26
1.2. 锂在硅和锗中的行为	27
1.2.1. 引言	27
1.2.2. 锂在硅和锗中的扩散和溶解度	31
1.2.3. 成对过程及其影响	37
1.2.4. 锂在硅和锗中的沉积现象	44
1.2.5. 结论	50
参考文献	51
1.3. 传输现象	52
1.3.1. 引言	52
1.3.2. 漂移速度的理论计算	53
1.3.3. 实验测定	60
1.3.4. 关于各向异性漂移速度的几点备注	70
参考文献	71
1.4. 产生空穴-电子对所需的平均能量 和法诺 (Fano) 因子	73

1.4.1. 引言	73
1.4.2. 产生空穴-电子对的平均能量——理论论述	74
1.4.3. 产生空穴-电子对的平均能量—— 对锗和硅的实验测定	79
1.4.4. 法诺因子——理论论述	85
1.4.5. 法诺因子——对锗和硅的实验测定	93
参考文献	96
第二章 探测器的性能与结构	99
2.1. N-P 探测器	99
2.1.1. 工作原理	99
2.1.2. N-P 结二极管的电性能	100
2.1.3. N-P 结二极管的探测性能	112
2.1.4. N-P 结二极管的制造	118
2.1.5. 制备 N-P 二极管采用的特殊工艺	121
参考文献	123
2.2. 面垒型二极管	124
2.2.1. 电特性	126
2.2.2. 半导体-金属界面上的整流作用	128
2.2.3. 面垒二极管的探测性能	134
2.2.4. 面垒二极管的制造	137
参考文献	140
2.3. 锂漂移硅[Si(Li)]和锂漂移锗[Ge(Li)]探测器	142
2.3.1. 锂离子漂移过程的原理和特性	142
2.3.2. Si(Li)二极管的制造	147
2.3.3. Si(Li)二极管的特性	153
2.3.4. Ge(Li)二极管的制造	157
2.3.5. Ge(Li)二极管的特性	170
参考文献	174
2.4. 特殊类型探测器	177
2.4.1. 引言	177
2.4.2. 位置灵敏探测器	177
2.4.3. 内放大探测器	181

参考文献	186
第三章 能量测量的电子学和时间分辨率	188
3.1. 低噪声电子学	188
3.1.1. 引言	188
3.1.2. 探测器噪声	191
3.1.3. 输入电阻的热噪声	192
3.1.4. 电子管的噪声源	192
3.1.5. 场效应晶体管的噪声源	198
3.1.6. 最佳讯号噪声比的前置放大器的设计	206
3.1.7. 等效噪声电荷的测量	217
3.1.8. 脉冲成形网络	218
3.1.9. 堆积效应	223
参考文献	228
3.2. 脉冲形状和时间分辨率	229
3.2.1. 引言	229
3.2.2. 由载流子收集产生的脉冲形状	229
3.2.3. 由于射线与半导体相互作用产生的脉冲形状	237
3.2.4. 在放大器系统输入端的电流和电压脉冲形状	246
3.2.5. 时间分辨率	251
参考文献	260
第四章 核辐射能谱学	262
4.1. 核辐射与物质相互作用的一般性质及其影响	262
4.1.1. 重粒子与物质的相互作用	262
4.1.2. 电子与物质的相互作用	274
4.1.3. γ 射线与物质的相互作用	277
4.1.4. 统计起伏及其对分辨率的影响	280
参考文献	283
4.2. 重带电粒子能谱测量学	283
4.2.1. α 能谱测量学	284
4.2.2. 在核反应中放射出的带电粒子能谱学	298
4.2.3. 粒子的鉴别	298
4.2.4. 裂变碎片能谱学	305

4.2.5. 沟道效应	310
参考文献	319
4.3. β 和电子谱仪	321
4.3.1. 引言	321
4.3.2. 性能	322
4.3.3. 应用	330
参考文献	342
4.4. X射线和 γ 射线能谱学	344
4.4.1. 引言	344
4.4.2. 作为光子谱仪的Ge(Li)和Si(Li)探测器	345
4.4.3. γ 射线谱仪的比较	364
4.4.4. 半导体 γ 射线谱仪的应用	369
参考文献	383
4.5. 中子探测和谱仪	386
4.5.1. 引言	386
4.5.2. 半导体夹层谱仪	387
4.5.3. 半导体质子反冲谱仪	412
4.5.4. 中子通量测量	417
参考文献	420
第五章 用于 γ 射线谱仪的半导体材料的探索工作	422
5.1. 引言	422
5.2. 对 Z 的要求和探测器的几何尺寸	424
5.3. 电荷的产生和收集	426
5.4. 对 $(N_D - N_A)$, 接触和 E_g 的要求	435
5.5. 各种要求的小结	439
5.6. 材料的采用价值; 离子注入	440
5.7. 关于半导体材料的评价	451
5.8. 结论	474
参考文献	475

前 言

近几年, 供各种学科应用的半导体探测器有了广泛而迅速的发展。作为其总结, 出版了泰勒(J. M. Taylor)著的《半导体粒子探测器》(1963年)和迪恩那利(G. Dearnaley)与诺思罗普(D. C. Northrop)合著的《核辐射半导体计数器》(1963年)等书。尽管后者再版仅过两年, 但是由于这一领域(尤其是锂补偿探测器)发展如此迅速, 因而需要有一本反映这个课题当前水平的新书。

近期以来, 有几次学术会议涉及到半导体探测器, 其中有:

1) 1965年8月20日至9月3日, 在新赫尔策格举办的物理训练班;

2) 1966年3月2日至4日, 在华盛顿召开的第十次闪烁和半导体计数器会议;

3) 1966年6月6日至10日, 在维也纳由国际原子能机构主办的“锂漂移锗探测器”小组讨论会;

4) 1966年6月24日在纽约由半导体粒子探测器国家研究理事会主办的“用于 γ 射线探测器的半导体材料”会议;

5) 1967年5月15日至18日, 讨论半导体探测器的格林会议。

最重大的进展和 γ 射线谱学中采用的锂补偿锗探测器有关。由于这些器件在整个 γ 射线能量范围内有高的分辨能力, 这就开辟了核性质研究工作的新领域。

本书是由几个作者分别写成, 尽量避免内容重复。本书力图反映出此领域的最新技术进展, 尤其着重于目前研究工作进行的活跃的几个课题。因此, 有几节专门用来讨论锂在硅和锗中的行为、由辐射产生电子-空穴对所需的平均能量以及法诺因子。又专用一章来讨论用于 γ 射线谱仪的半导体新材料的探索工作。

本书不仅是写给对核谱学感兴趣的人看的，也是写给对半导体物理性质感兴趣的人看的，因为半导体的若干性质可随着研究探测器性能而进一步得到研究。

因篇幅所限，本书没有论述半导体探测器用作计数器这一方面的内容。而且遗憾的是省去了探测器辐射损伤的研究这一节，这主要是因为迪恩那利和诺思罗普的著作中已有论述，而近几年来在这方面发表的文献又不多的缘故。

原 编 者

1968 年 6 月

绪 言

科 什

法国斯特拉斯堡-克罗南堡核子研究中心

核辐射对晶体影响的最初研究(约 1930 年)证明了存在着由辐射引起的导电性。这些早期工作的文献目录可在贾菲(Jaffe)^[1]的文章中查到。但是,由于小数量的观察效应、极化现象以及缺乏合适的材料,在很长时期内使得晶体未能作为单独的辐射探测器来使用。而在同时,气体探测器如电离室、正比计数器、盖革计数器却得到了广泛的发展。

1945 年,范希尔登(Van Heerden)^[2]介绍了第一个有实际用途的电导型计数器。它是由在晶体上放置两个金属电极,形成一个固体电离室所构成。为了分开由电离粒子产生的带电载流子,就必须用外加电压在器件中产生一个强电场。许多研究工作者对各种类型的晶体作了试验,既有在室温条件下的试验[斯特泰尔(Stetter)等人^[3,4]利用金刚石,弗雷里奇斯(Frerichs)^[5]利用硫化镭],也有在低温条件下的试验[范希尔登^[2]和霍夫施塔特(Hofstadter)^[6]利用银和铊的卤化物]。范希尔登^[2]以及霍夫施塔特^[7]研究了这些探测器的主要性能:产生一个电子-空穴对所需的平均能量,对辐射能量的响应以及电荷收集时间。正如对电离室所观察的一样,探测粒子存在一个电荷收集问题。但是,电导型计数器具有某些优点:它的阻止本领高,体积小(1 毫米厚的硅能吸收 12 兆电子伏的质子,而此质子在空气中约有 1 米的射程),此外,在半导体中产生一对载流子所需的能量为气体介质中的十分之一,这就意味着产生的载流子数的统计起伏比较小,而且由于晶体体积小和增加了载流子迁移率的缘故,固体探测器的响应比气体计数器

的快。尽管霍夫施塔特作了一些实验，但是这类探测器的应用仍由于几个缺点受到了限制。例如存在内部极化效应降低了所加的电场，载流子俘获引起电荷收集不足，此外，探测器要用冷却来减少电流。然而，最近诺思罗普^[8]和吉本斯(Gibbons)^[9]完成了一些实验：他们利用冷却到 78°K 的高阻硅 (5000 欧姆·厘米) 对于 30 兆电子伏的质子、620 千电子伏的电子和 1 兆电子伏的 γ 射线得到的能量分辨率分别为 2.6, 5.2 和 5.8%。还必须提到，早在 1960 年，由砷化镓制作的电导型计数器就被用来探测 γ 射线[哈丁(Harding)^[10]]。

为了避免电导型计数器中的主要麻烦——载流子俘获，就需要有一个强的电场(而不使探测器的漏电流有任何增加)。当器件加反向偏压时，在扩散的 N-P 结中或金属-半导体接触中就存在着这样的电场。在这些器件中，不论在 N 和 P 区的结中或在金属和半导体结中都存在一个空间电荷区域。这个区域称为耗尽区并且在其中没有自由载流子，这是因为少数带电载流子被电场清除了。耗尽层的厚度正比于所加偏压和原材料电阻的平方根。因此，当核辐射在这一区域里产生电子-空穴对时载流子被电场迅速地清除而流向各自的电极，复合的几率很小。这样，在电极上观测到的脉冲高度正比于辐射在探测器中的能量损失。这种耗尽区器件的出现与 1950 年以来获得具有长载流子寿命的很纯的半导体的可能性相结合，才能制备出现在普遍采用的计数器。这些探测器首先是由贝尔电话实验室的麦凯(Mac Kay) 和珀杜大学的拉克-霍罗威茨(Lark-Horowitz)研制的。

麦凯^[11]首先用加反向偏压的锗点接触二极管来探测钚²¹⁰ 的 α 粒子，他研究了脉冲高度随偏压的变化。不久，拉克-霍罗威茨等人^[12]测量了 P-N 结二极管对钚²¹⁰ 的 α 粒子和铋²¹⁰ 的 β 粒子的响应。在类似的实验中，麦凯^[13]发现了计数效率是 100%，而产生一对电子-空穴需要的能量等于 3.0 ± 0.4 电子伏。麦凯^[14]也观察到了当偏压接近击穿电压时，在受到 α 粒子轰击的硅和锗的 N-P 结二极管中出现载流子倍增现象。

珀杜大学的西蒙(Simon)^[15]注意到:当 α 粒子打到金-锗面垒型二极管时就出现脉冲,二极管的整流接触是在N型锗片上通过蒸发覆上一层金而制成的。迈耶(Mayer)^[16]在这一类器件的性能研究中,证实了脉冲高度正比于入射粒子的能量并用一种有效面积为6平方毫米的探测器,对铀²¹²的 α 谱线得到了12%的分辨率。在同一时期,艾雷佩特扬茨(Airapetyants)等人^[17]研究了N-P二极管的性能,而戴维斯(Davis)^[18]制备了第一个金-硅面垒型探测器。

1958年以来,发表了一些更加广泛的研究成果。沃尔特(Walter)等人^[19]描述了金-锗面垒探测器的制备技术和理论特性。他们成功地制成了有效面积为5平方厘米的探测器,并且用一种在77°K时工作的有效面积为0.3平方厘米的探测器对铀²³³的 α 粒子得到4%的分辨率。他们还应用这些器件,在低温下(4.2°K)探测定向核发射的 α 粒子和裂变碎片。同一时期,迈耶^[20]作了用 α 粒子轰击锗和硅面垒型探测器的一系列实验,他发现这类探测器对硅在直到6兆电子伏而对锗在直到7.5兆电子伏的能量范围内是线性的;并且测定了形成电子-空穴对所需的能量 w ,对锗和硅分别是2.96和3.9电子伏。同时麦肯齐(Mac Kenzie)^[21]研究了N-P结二极管,对分辨率、 w 值等得到了类似的结果。

1960年美国 and 欧洲的一些实验室着手制备和研究这些探测器。在华盛顿^[22]、加特林堡^[23]和阿什维尔^[24]会议上报告了一些关于N-P结和面垒型探测器的电特性、表面状态的影响、减少漏电流、脉冲上升时间以及核物理应用等方面的研究结果。从那以后,实际上放弃了锗而倾向于用硅。此外,N-P结型和面垒型探测器得到了广泛的发展,出版了有关这个课题的大量文献(见参考文献[22~29])。到目前为止,我们对面垒型计数器的整流作用原理了解得还很肤浅,但由于以后将讨论到的某些原因,面垒型计数器比N-P结二极管更多、更普遍地用来探测重粒子。

为了说明所取得的进展,看一看这些探测器在各种应用场合中的性能是有意义的:

——在室温下，用 5 兆电子伏的 α 粒子轰击各种二极管得到的分辨率的数值列在表 1 中。为了比较起见，可以提一下电离室的分辨率是 0.4~0.8%，它们相当于谱线在最大值一半处的全宽度 (FWHM)* 分别为 20 和 40 千电子伏。

表 1 典型探测器的性能

有效面积 (平方毫米)	8	100	950
半宽度 (千电子伏)	13	20	90

——可以探测能量低到 10 千电子伏的质子。发现灵敏厚度为 1.5 毫米时，对能量直到 60 兆电子伏的 α 粒子有线性响应。

——应用高阻硅二极管可测得约 1 毫微秒的上升时间。

——某些情况下，应用高阻硅和高偏压时，能得到约 5 毫米的耗尽区。另一方面，也能得到象 4 微米那样薄的 dE/dx 计数器。

——已装配了一些计数器，准备用在几乎任何一种所要求的特殊探测配置中(环状的或镶嵌的等)。

结型和面垒型计数器的应用已经很普遍了。在 α 粒子能谱测量中，即使这些探测器的分辨率不如磁谱仪好，但它们也具有某些优点，如几何条件好，本底低以及能完成长时间实验的稳定性。这些探测器的高分辨率和薄的人射窗，使它们适用于探测裂变碎片。有许多研究工作专门致力于探测重的裂变碎片时所观测到的脉冲高度亏损及非线性。这些行为部分是由于沿着离子径迹扩展的密集等离子体的复合效应造成带电载流子损失所引起的，部分是由于核碰撞引起的。结型和面垒型探测器最重要的应用是在核辐射能谱学方面。在这方面它们有着许多优点，如：极好的分辨率；在很宽的能量范围内的线性响应；快的响应；对后粒子的甄别和鉴定；能较容易地改变它的灵敏区和几何条件等。借助于在探测器前面的转换体内或半导体本体内发生的 (n, α) 或 (n, p) 反应，这类探测器能用来探测中子和测量中子谱。

* FWHM, 简称为半宽度。——译者注

这些计数器的迅速发展和与其相关连的电子学器件的进展有关。为了避免脉冲高度随所加偏压变化，需要一种有电容反馈的电荷灵敏前置放大器。这样，前置放大器的输出端电压脉冲就与输入电容无关。此外，由于讯号幅度小，就必须用低噪声放大器。采用电子管和晶体管的栅地-阴地放大器电路，能构成具有约 1.5 千电子伏谱线宽度的前置放大器。场效应晶体管的出现，使分辨率得到进一步改善。当冷却时，前置放大器使谱线宽度增加部分可以低于 0.35 千电子伏(没有外加电容)。

为了把这些应用扩展到探测电子，就需要有效体积大的二极管(为了吸收一个 600 千电子伏的电子就需要 1 毫米厚的硅)。可惜目前的技术水平限制了可用厚度(应用高阻硅和高偏压时约为 3 毫米)。因此，发展了一种新的方法，它是用施主杂质补偿 P 型半导体中的受主。这样就能得到尽管不是本征的，却有很高电阻的材料。锂被选作施主杂质，这是因为它容易电离，并且作为离子它有高的迁移率。实际上，为了形成 N-P 结，在把锂扩散到 P 型硅片里以后，由于电场的作用和提高了温度，锂就被漂移到半导体内。形成的 N-I-P 器件的有效厚度可达 16 毫米。尽管这些探测器的分辨率(1 电子伏~2 千电子伏)还比不上最好的磁谱仪，但它们应用于转换电子能谱学却是非常适合的。另一方面，当它们与多道分析器配用时，可以用来研究短寿命的发射体。对于 γ 射线能谱测量来说，因为硅的原子序数小($Z=14$)，它的探测效率就更低。但是对于能量小于 100 千电子伏的 γ 射线，仍然经常采用这些器件而不用锗计数器，因为它既不要冷却，又不要表面保护。例如，对能量为 26.36 千电子伏的镭²⁴¹ γ 射线得到了 0.54 千电子伏的谱线宽度。

为了获得较高的 γ 射线探测效率，就必须用比硅原子序数高的材料。由于现在没有其它半导体材料可利用，因此将锂补偿方法用于锗中。这样得到的探测器对 γ 射线的探测效率很高^[30]，这是因为就光电效应的线性吸收系数而言，锗大于硅，在能量为 100 千电子伏时大 50 倍，在 500 千电子伏时大 25 倍。硅探测器和锗探

测器的制造原理是一样的。但由于表面状态的影响，制备锗探测器比较困难。为了降低噪声，锗探测器必须保持在真空中和在液氮温度下。最初，得到的体积限于几立方厘米。至于硅，其补偿厚度限制在约 10 ~ 15 毫米。近来发展的同轴二极管已经可以制备较大尺寸的探测器（目前可达到 100 立方厘米）。一个 50 立方厘米二极管的效率与 1.5 吋 × 1 吋的铀激活碘化钠晶体同数量级。

对 γ 射线谱学来说，锂漂移锗计数器是非常重要的，因为它有高的能量分辨率，在 100 千电子伏时半宽度约为 0.75 千电子伏，在 1 兆电子伏时约为 2 千电子伏。把这些结果与其它类型的 γ 谱仪的结果作一比较是有意义的。碘化钠晶体的分辨率在任何能量下都不能与锂漂移锗探测器相比拟，因为典型的铀激活碘化钠谱仪具有的分辨率，对 100 千电子伏是 20 千电子伏，对 1 兆电子伏是 60 千电子伏。在约 400 千电子伏以下时，锂漂移锗探测器的分辨率低于晶体衍射谱仪，而后的效率却很低。对于几兆电子伏能量的 γ 射线，锂漂移锗探测器的分辨率可以与外转换磁谱仪相比拟。而且，即使锂漂移锗探测器的体积只有几立方厘米，它仍然有很高的效率。锂漂移锗计数器与好的放大器组合时，它的线性允许以高于 0.1% 的精确度来测定 γ 射线的能量，这可以与在几百千电子伏下的衍射谱仪相比较。上述性能说明了锂漂移锗探测器迅速发展的原因。在最近三年，它已应用于核 γ 射线谱学、转换系数的测定（与锂漂移硅探测器一起）、在低温下的核定向实验及放射性活化分析等。

在这个半导体探测器进展的简短评论中，说明了近几年来这些器件所占有的重要地位，论述这种课题的文章和书籍之多更强调了它的重要性。为了使这个评论更完整，还必须提到下述事实：即最近利用 N-P 结二极管中的倍增现象来产生一种内放大系统以及利用离子注入技术来制备 N-P 结二极管。实际上，半导体探测器的工作几乎全部用硅或锗来完成的，这些材料的工艺相当先进，对于用 III-V 或 II-VI 族半导体来生产探测器只作了少量的尝

试。目前,人们对研究一种比铯漂移锗二极管效率更高,能在室温下工作的探测器的兴趣越来越大。在目前的工艺条件下,碲化镉似乎是最能满足这些要求的。但是,这方面的工作尚无很大的进展。

参 考 文 献

1. G. JAFFE, Phys. Z. 33 (1932) 393.
2. P. J. VAN HEERDEN, The crystal counter, Utrecht Dissertation (1945).
3. G. STETTER, Verhändl. Deut. Physik. Ges. 22 (1941) 13.
4. F. C. CHAMPION, Phil. Mag. (Suppl.) 5 (1956) 383.
5. R. FRERICHs, Phys. Rev. 72 (1947) 594.
6. R. HOFSTADTER, Phys. Rev. 72 (1947) 1120.
7. R. HOFSTADTER, Nucleonics 4, N^o. 4 (1949) 2; id., Nucleonics 4, N^o. 4 (1949) 29.
8. D. C. NORTHROP and O. SIMPSON, Proc. Phys. Soc. 80 (1962) 262.
9. P. E. GIBBONS and D. C. NORTHROP, Proc. Phys. Soc. 80 (1962) 276.
10. W. R. HARDING, C. HILSUM, M. E. MONCASTER, D. C. NORTHROP and O. SIMPSON, Nature 187 (1960) 405.
11. K. G. MAC KAY, Phys. Rev. 76 (1949) 1537.
12. C. ORMAN, H. Y. FAN, G. J. GOLDSMITH and K. LARK-HOROWITZ, Phys. Rev. 78 (1950) 646.
13. K. G. MAC KAY, Phys. Rev. 84 (1951) 829.
14. K. G. MAC KAY and K. B. MAC AFE, Phys. Rev. 91 (1953) 1079.
15. E. SIMON, Ph. D. Thesis, Purdue University (1955).
16. J. W. MAYER and B. GOSSICK, Rev. Sci. Instr. 27 (1956) 407.
17. A. V. AIRAPETYANTS and S. M. RYVKIN, Zh. Tekhn. Fiz. 27 (1957) 95;
A. V. AIRAPETYANTS, A. V. KOGAN, N. M. REINOV and I. A. SOKOLOV, Zh. Tekhn. Fiz. 27 (1957) 1599.
18. W. D. DAVIS, J. Appl. Phys. 29 (1958) 231.
19. F. J. WALTER, J. W. T. DABBS, L. D. ROBERTS and H. W. WRIGHT, O.R.N.L. Rep. CF-58-11-99, (1958);
F. J. WALTER, J. W. T. DABBS and D. L. ROBERTS, Rev. Sci. Instr. 31 (1960) 756.
20. J. W. MAYER, J. Appl. Phys. 30 (1959) 1937.
21. J. M. MC KENZIE and D. A. BROMLEY, Proc. IRE 106 (1959) 731.
22. Proceedings of the Seventh Scintillation counter Symposium, Washington, IRE Trans. Nucl. Sci. NS 7 (1960).
23. Proceedings of the Seventh Annual National Meeting, Solid state radiation detectors, IRE Trans. Nucl. Sci. NS 8 (1960).
24. Semiconductor nuclear particle detectors, N.A.S. Public. 871, Washington (1961).
25. Proceedings of the Conference on Nuclear electronics, Vol. 1, Belgrade (1961).
26. Proceedings of the Eighth Scintillation counter Symposium, Washington, IRE Trans. Nucl. Sci. NS 9, N^o. 3 (1962); Proceedings of the Ninth Scintillation and semiconductor counter Symposium, Washington, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS 11, N^o. 3 (1964).
27. Colloque sur l'utilisation des détecteurs à semiconducteurs en physique nucléaire, Mem. Soc. Roy. Sci. Liege 10 (1964).
28. G. DEARNALEY and D. C. NORTHROP, Semiconductor counters for nuclear radiations. (Spon, London, 1966).
29. J. M. TAYLOR, Semiconductor particle detectors (Butterworths, London, 1963).
30. IEEE Trans. Nucl. Sci. NS 12, N^o. 1 (1965); IEEE Trans. Nucl. Sci. NS 13, N^o. 1 (1966); IEEE Trans. Nucl. Sci. NS 13, N^o. 3 (1966).

