

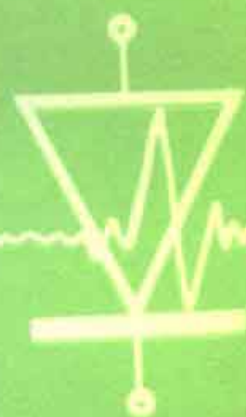
当代科技重要著作·信息领域

半导体光电技术丛书

半导体光检测器

〔美〕W·T·TSANG 主编

杜宝勋等 译 江剑平 校



电子工业出版社
清华大学出版社

7N31

357559

当代科技重要著作·信息领域

半导体光电技术丛书

半导体光检测器

[美] W. T. TSANG 主编

杜宝勋 等译 江剑平 校

电子工业出版社
清华大学出版社

024/00/03
(京)新登字 055 号

内 容 提 要

本书是《半导体光电子技术》丛书中的一个分册,共五章,即雪崩光电二极管物理、化合物半导体光电二极管、硅和锗雪崩光电二极管、用于高比特率长波长光通信系统中的雪崩光探测器接收机的灵敏度、光通信用的光晶体管等。本书说理简明、内容翔实,对我国从事半导体光电子技术教学、科研、工程技术及其他有关的人员来说是一本难得的参考书。

半导体光电子技术丛书

半导体光检测器

[美] W. T. TSANG 主编

杜宝勋等译 范剑平 校

责任编辑 吴金生

电子工业出版社

出版

清华大学出版社

电子工业出版社发行 各地新华书店经销

中国科学院印刷厂印刷

☆

开本: 850×1168 毫米 1/32 印张: 14.5 字数: 390 千字

1992 年 3 月第 1 版 1992 年 3 月第 1 次印刷

印数: 2000 册

ISBN 7-5053-1537-4/TN·440

定价: 11.00 元

半导体光电技术丛书

编 审 组

王启明 周炳琨 杜宝勋

江剑平 孙宝寅 吴金生

出版前言

由美国 AT&T 贝尔实验室 W.T.TSANG 主编的《光通信技术》丛书是一套在世界享有声誉的学术专著。该套丛书共分七册,前五册讨论的是半导体光电子技术,载入《半导体与半金属》第 22 卷;后两册讨论的是光纤技术及传输系统,载入《光纤通信》论文集。现在我们出版了前五册的中文版,并将原书各册的顺序作了调整,旨在介绍国外光电子技术领域研究的新成果,并定名为《半导体光电子技术丛书》。它包括:

- 第一册 半导体注入型激光器 (I)
- 第二册 半导体注入型激光器 (II) 和发光二极管
- 第三册 半导体光检(探)测器
- 第四册 半导体集成光电子学
- 第五册 半导体材料生长技术

原书由美国、日本、法国的 38 位专家撰稿,全面、系统地总结了近 20 年来半导体光电子材料、器件与集成技术研究方面的重要成果,既有理论和技术的论述,又提供了大量的数据、资料,对我国从事半导体光电子技术的教学、科研及工程技术人员,将是一套具有借鉴和启迪作用的参考书。

丛书得以出版,要感谢国家高技术光电子专家组的推荐与支持,感谢杜宝勋副研究员、江剑平副教授在组织这套丛书的翻译及审校方面所作的大量工作。欢迎读者对本书存在的缺点和错误给予批评指正。

1990 年 3 月

原 书 序 言

当印第安人利用烟火传递信息时,便蕴育着现代光通信的想法。当时由一个山顶上放出断断续续的青烟就是一种数字信号;这信号是以青烟的出现与消失为编码,确实是二进制的。光是信息载体,空气是传输介质,人眼是光检测器。信号由一个山顶传向另一个山顶,其作用相当于是信号的再放大,正如今天的中继器。1880年,亚历山大·格拉汉·贝尔采用太阳光束作为载体将声音信号传递了200米以上的距离,称之为光话。远在这个历史性实验之前,人类就设计并使用了光通信。然而直到1977年才敷设了第一个商用光通信系统。这项新技术的完善,包括研制坚固耐用的近红外光源—可对信息进行调制,低损耗的传输介质,灵敏的光检测器—可无误地恢复并再现光源发出的信息。

1958年,激光器的问世及演示性实验在光通信方面立即引起了新的兴趣和广泛的研究,然而光通信实用化的美好前景,只有当三个主要技术问题日趋成熟后才展现出来。第一个技术问题是1962年研制成功电流注入型半导体激光器,1977年可做到其连续工作寿命达一百万小时以上;第二项技术是在1970年获得了光损耗为 20dB/km 的掺杂石英光纤,证实了高纯石英与同类介质相比具有最低的光损耗。1973年发现,经过适当热处理的掺硼石英的折射率低于高纯石英的折射率。最近又研制成功了超低损耗(0.12dB/km)的掺铈石英光纤;第三项技术是在七十年代研制成功了低噪声光检测器,它使超高灵敏度光接收机变为现实。可以说,高可靠的注入型半导体激光器、低损耗光纤及低噪声光检测器的研究进展,促进了光波通信技术的实用化,并显示出了比普通的电传输系统的优越性。

由于光纤通信涉及到许多技术问题,包括电通信系统、玻璃及

半导体光电子技术等,在过去的 20 年内人们进行了大量的研究工作,我们试图在这套丛书中总结所积累的知识,并定名为《光波通信技术》。这套丛书由七册组成,前五册讨论半导体光电子技术,据其内容载入《半导体与半金属》;而后两册,一册是讨论光纤技术,另一册是讨论传输系统,他们被载入厉鼎毅和 W. T. TSANG 编著的《光纤通信》。

本卷第一册讨论半导体生长技术,详细说明了各种 III-V 族化合物半导体的外延生长技术和材料缺陷,包括液相外延、分子束外延、常压和低压金属有机化学汽相沉积,以及卤化物和氯化物输运汽相沉积。每种技术单独成章,而半导体材料缺陷则另有一章专门讨论。

本卷第二册和第三册讨论光谱范围为 $0.7\text{--}1.6\mu\text{m}$ 和 $2\mu\text{m}$ 以上的注入型激光器和发光二极管的制作、特性和应用。具体地说,第二册各章包括半导体激光器的动态特性与亚皮秒脉冲锁模、高速电流调制和光谱特性、动态单频分布反馈激光器和解理耦合腔半导体激光器。第三册各章介绍的有关内容是,半导体激光器方面的是评述激光器结构及其性能比较、横模稳定方案、半导体激光器发射机的功能可靠性以及波长超过 $2\mu\text{m}$ 的半导体激光器。发光二极管方面的讨论分为三章,即发光二极管器件设计、发光二极管的可靠性及它在传输系统中的应用。第二册和第三册应被视为一个整体,而不是分别独立的两册。

本卷第四册专门讨论光检测技术,详细地介绍了雪崩光二极管的原理,采用 Si、Ge 和 III-V 族化合物制作的雪崩光二极管及光晶体管。还有一章讨论用于高速率长波长光通信系统的雪崩光二极管接收机的灵敏度。

本卷第五册讨论集成光电子学和半导体光电子器件的其它应用,详细说明可以集成的有源和无源光器件的原理和性能以及集成光电子器件的性能。还有一章讨论半导体激光器在光传输系统中作为光放大器的应用,这是其最新应用的一个示例。

由于题材不同,本丛书的后两册载入不同的论文集为宜。讨论

光纤技术的一册,包括光纤的设计和制作、光学特性及非线性光学等。最后一册讨论光传输系统,包括光波系统基础、光发射机和光接收机设计理论、半导体激光器在相干光传输系统中的频率调制和相位调制。

所以,这套包括七册的丛书全面地讨论了整个光波通信技术。丛书的每位作者均来自从事该领域研究和发展的单位。

作为一名客座编辑,我衷心感谢 R. K. Willardson 和 A. C. Beer, 他们给了我一个宝贵的机会,把这样一个重要的、具有爆炸性的技术在《半导体与半金属》上介绍给读者。我也衷心感谢诸位作者及其所在的单位,正是在他们的努力和支持下本丛书才得以问世。最后,我要向 AT&T Bell 实验室为完成此项工作所提供的一切方便和必要的条件表示敬意,也向 C.K.N. Patel 为本丛书撰写前言表示敬意。

W.T.Tsang

目 录

出版前言.....	ii
原书序言.....	iii
第一章 雪崩光电二极管物理.....	1
I. 引言	2
II. 碰撞离化理论	3
III. 雪崩倍增与离化系数的测量	69
IV. 高性能雪崩光电二极管和固态光电倍增管	109
参考文献.....	176
第二章 化合物半导体光电二极管.....	181
I. 引言	182
II. 化合物半导体光电二极管原理	195
III. 化合物半导体光电二极管特性	208
IV. 集成光电二极管器件	238
参考文献.....	255
第三章 硅和锗雪崩光电二极管.....	260
I. 引言	261
II. 设计依据	262
III. 硅雪崩光电二极管	276
IV. 锗雪崩光电二极管	299
V. 最小可探测功率	326
VI. 结论	330
参考文献.....	332
第四章 用于高比特率长波长光通信系统中的雪崩光探测器 接收机的灵敏度.....	336

I. 引言	337
II. 数字接收机的灵敏度	339
III. 接收机的噪声电流	344
IV. 灵敏度计算	352
V. 实例	365
VI. 灵敏度降低的原因	375
VII. 结语	393
参考文献	393
第五章 光通信用的光晶体管	396
I. 引言	396
II. 增益特性	398
III. 瞬态响应和带宽	416
IV. 噪声特性	421
V. 雪崩效应	428
VI. 新结构	435
VII. 场效应晶体管的光敏性	445
VIII. 小结	449
参考文献	449

第一章 雪崩光电二极管物理

Federico Capasso

美国 贝尔实验室

张维恒 杜宝勋 译

I. 引言	2
II. 碰撞离化理论	3
1. 离化阈值能量	3
2. 碰撞离化截面与隧道碰撞离化	18
3. 强电场内的声子散射作用	22
4. 电子和空穴的分布函数及离化系数	32
5. Shockley、Wolff 和 Baraff 的理论	35
6. Baraff 理论和偶然 (Lucky) 漂移模型的物理解释	40
7. 离化系数的其它分析表达式	46
8. 有效离化能量	53
9. 与能带结构有关的理论	55
III. 雪崩倍增与离化系数的测量	69
10. 雪崩速率方程	69
11. 测量方法	78
12. Si、Ge 和 III-V 族半导体的实验离化系数	83
IV. 高性能雪崩光电二极管和固态光电倍增管	109
13. 雪崩过剩噪声	109
14. 多 $p-n$ 结异质结构雪崩光电探测器	113
15. 渐变带隙雪崩光电探测器	116
16. 超晶格雪崩光电探测器	122
17. 阶梯带隙固态光电倍增管	135
18. 沟道型雪崩光电探测器	149
19. 赝四元半导体: 一种新的渐变带隙超晶格高速 APD	172

I. 引 言

近些年来,随着光纤通信技术的发展,雪崩光电二极管(APD)又引起人们普遍的关注,并对它继续进行深入的研究。充分利用石英光纤在 $1.3\mu\text{m}$ 及 $1.55\mu\text{m}$ 的低色散和低损耗窗口特性,以求开发新的光通信系统。

对于 $1.06\mu\text{m}$ 以下的波长,硅雪崩光电二极管是光纤通信系统的理想探测器。而对于长波长,为了开发适用的低噪声 APD,人们致力于研究二元(例如 InP、GaSb)和三元/四元(例如 InGaAs、InGaAsP、AlGaAsSb) III-V 族半导体。

为了制作高性能的低噪声 APD,必须令电子和空穴的离化系数十分不同才行。近些年来,报导过许多有关离化系数测量的结果,从而优选出一些适用于制作长波长 APD 的新材料。

通过对半导体能带结构的深入了解,弄清了 III-V 族半导体离化系数与能带结构的内在联系。在碰撞离化过程中,载流子获得了带隙量级的能量。因此,APD 不仅是实际应用的重要器件,而且也是探讨能带结构和热载流子物理问题的有效手段,这是别的办法难以完成的。

在应用方面,了解 APD 的物理过程十分重要,它可以指导你选择适用于 APD 的材料。突出的例子是与能带结构相关的重要现象的发现,即所谓碰撞离化共振增强现象,这对确定适用的 III-V 族及 II-VI 族合金材料起着重要的作用。

研究结果表明,对于大多数 III-V 族材料(少数例外),其电子离化系数与空穴离化系数相差不大,因此,它们不适于制作噪声特性可以与硅器件性能相比拟的 APD。这就要求探索改变电子与空穴离化系数比 α/β 的新途径,诸如利用超晶格材料、渐变带隙材料、以及调制掺杂等新材料。这些新材料允许人们将普通 p-n 结探测器的能带图加以任意修改,以设计其离化系数比 α/β (见

《带隙工程》，Capasso, 1983a, b)。

按照“带隙工程”的设想，提出了一种新型探测器，即所谓阶梯带隙雪崩光电二极管的概念。这种新型器件具有实际无噪声雪崩倍增的潜力，可以称之为固态光电倍增管。从而使光纤通信系统的接收机灵敏度获得前所未有的提高。本章将介绍有关的重要进展。

第 II 部分将讨论 APD 的微观物理基础，在讨论碰撞离化理论的发展中，着重分析离化阈值能量的重要作用。第 III 部分介绍碰撞离化的宏观描述，例如表示雪崩增益的离化系数，讨论对测量方法的改进，并给出 Si、Ge 和 III-V 族材料离化系数的数据，同时讨论一些新的能带结构现象。

最后，第 VI 部分专门介绍提高离化系数比的新型 APD 结构，给出阶梯带隙固态光电倍增管的详尽分析。

II. 碰撞离化理论

1. 离化阈值能量

半导体中的碰撞离化效应，系指强电场作用将自由载流子(电子、空穴)加速到足够高的能量，使得电子从价带跃迁到导带的过程。观测到碰撞离化所需的电场强度取决于半导体材料的带隙，在室温下其范围由窄带隙半导体(例如 InAs, $E_g = 0.33\text{eV}$)的 $\sim 10^4 \text{Vcm}^{-1}$ 到宽带隙材料(例如 GaP, $E_g = 2.24\text{eV}$)的 10^5Vcm^{-1} 以上。

碰撞离化所需的最低能量叫做离化阈值能量 E_{i0} 。离化阈值能量严重影响电子及空穴的离化系数(分别以 α 及 β 表示)。所谓离化系数，定义为当电子或空穴沿着电场方向加速运动时，因碰撞离化而产生新的电子-空穴对所需经过的平均距离的倒数。一连串的碰撞离化过程，就造成雪崩倍增现象。 α 、 β 的大小，电场区长度，以及载流子注入条件，三者决定了雪崩增益的大小。

碰撞离化是一个三体碰撞过程，碰撞后的载流子(称之为终态

载流子)仍然以有限的动能和动量继续运动,这意味着发生碰撞离化的载流子(称之为始态载流子)所具有的能量通常应大于带隙。

离化阈值能量 E_i 取决于半导体的能带结构。对于电子及空穴有效质量彼此相等的抛物线型能带, 阈值能量 E_i 的计算比较简单, 可以按照能量和动量守恒的简单条件来加以计算 (Wolff, 1954)。但是, 近二十年来广泛的实验和理论研究结果表明, k 空间内, 能带一般具有复杂的结构, 表现为非抛物线型、多能谷和很强的各向异性等特征。利用非局域赝势算法, 可以精确地决定半导体的能带结构 (Chelikowsky 和 Cohen, 1979)。因此, 有必要建立一个普遍的精确算法来计算离化阈值能量。

Keldysh(1960) 首先提出了碰撞离化的阈值条件, 该条件以离化后终态载流子的总能量最小为基础。Anderson 和 Crowell (1972) 未知上述结果也推导出这个条件, 并发展成一种新算法, 使之适用于一般的能带结构。利用这种算法, 根据已知的能带结构计算了许多半导体(特别是 III-V 族半导体)的离化阈值能量 (Anderson 和 Crowell, 1972; Pearsall 等, 1977a; Pearsall, 1979)。Balliger 等(1973)提出了另一种也许更精确的方法, 根据已知的能带结构来计算离化阈值能量。

本文只讨论第一种算法, 它在物理图象上具有更为直观的优点。应用这种算法对若干 III-V 族半导体能带结构的碰撞离化阈值, 包括与其逆过程(俄歇效应)的关系进行了数学描述 (Robbins, 1980a~c)。

试考虑图 1 所示的典型碰撞离化过程, 导带 i 内的始态电子与价带电子 3 碰撞离化后, 使之由价带跃迁到导带 c' 内。在许多实际情况下, c 与 c' 为同一能带, 故只考虑 c 这一种情况。

碰撞离化后, 终态载流子的总能量 E_f 和总动量 K_f 为:

$$E_f = E_c(k_1) + E_c(k_2) - E_v(k_3) \quad (1)$$

$$K_f = k_1 + k_2 - k_3 \quad (2)$$

其中 $E_c(k)$ 为能带 c 内具有波矢 k 的载流子能量。

为了求出离化阈值能量, 须分步骤进行计算:

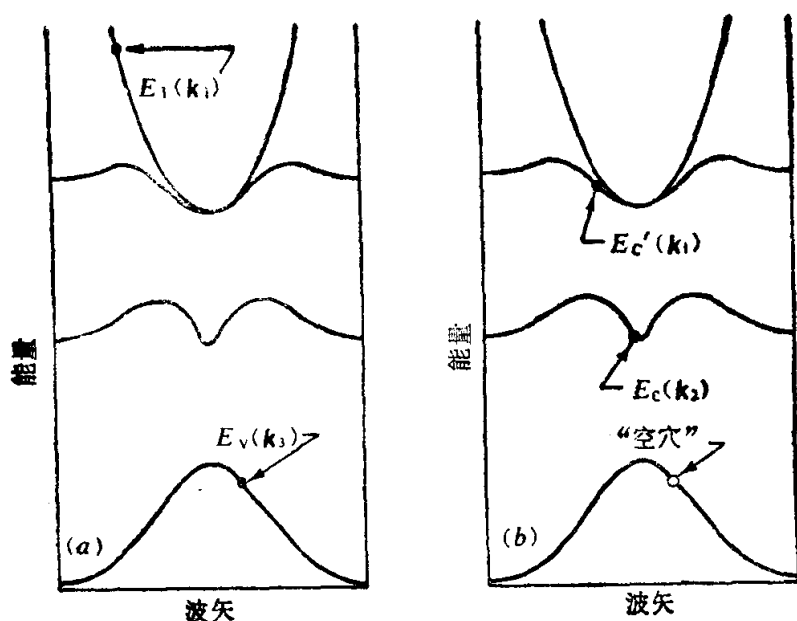


图 1 设想的碰撞离化过程

(a) 离化前的始态载流子; (b) 离化后产生的载流子

[引自 Anderson 和 Crowell (1972)]

1. 对应于终态载流子波矢的微小变化, 求出给定动量 $\mathbf{K}_f$ 下的总能量 E_f 的最小值。

2. 能量与动量守恒。

第一步, 在数学上表示为:

$$d\mathbf{K}_f = d\mathbf{k}_1 + d\mathbf{k}_2 - d\mathbf{k}_3 = 0 \quad (3)$$

$$dE_f = d\mathbf{k}_1 \cdot \nabla_{\mathbf{k}} E_v(\mathbf{k}_1) + d\mathbf{k}_2 \cdot \nabla_{\mathbf{k}} E_c(\mathbf{k}_2) - d\mathbf{k}_3 \cdot \nabla_{\mathbf{k}} E_c(\mathbf{k}_3) = 0 \quad (4)$$

将(3)式代入(4)式, 并令 $\mathbf{v}_g = \nabla_{\mathbf{k}} E(\mathbf{k})/\hbar$, 其中 $\mathbf{v}_g$ 为具有动量 $\mathbf{k}$ 及动能 E 的载流子的群速度, 则得

$$d\mathbf{k}_2 \cdot (\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_3) + d\mathbf{k}_3 \cdot (\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_3) = 0 \quad (5)$$

当 $\mathbf{K}_f$ 为常量时, $d\mathbf{k}_2$ 与 $d\mathbf{k}_3$ 线性无关。因而, 只有当

$$\mathbf{v}_1 = \mathbf{v}_2 = \mathbf{v}_3 \quad (6)$$

时, (5)式成立。也就是说, 具有最低能量的载流子碰撞离化产生

电子-空穴对,其必要条件是终态载流子具有相同的群速度 (Keldysh, 1960; Anderson 和 Crowell, 1972)。

第二步,能量与动量守恒,要求终态载流子总能量的最小值 $E_{fm}(\mathbf{k}_f)$ 等于原来能带 i 内具有波矢 $\mathbf{k}_i$ 的始态电子的能量 $E_i(\mathbf{k}_i)$ 。但是,这并不保证在任意 $\mathbf{k}_f$ 下均可发生碰撞离化,换句话说,(6)式不是碰撞离化的充分条件。

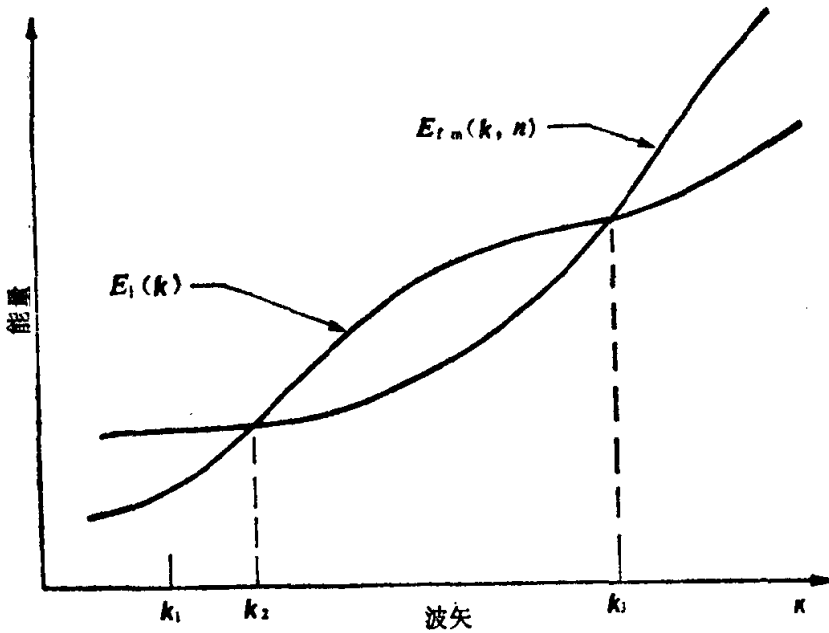


图2 假想的 E_i 和 E_{fm} 随 k 变化的关系曲线;以表示在 k_2 和 k_3 处分别为阈值和反阈值的物理过程
[引自 Anderson 和 Crowell (1972)]

为了更好地理解这一点,考虑两条假想的曲线 $E_i(\mathbf{k})$ 及 $E_{fm}(\mathbf{k})$, 如图2所示。当 $k < k_2$ 时, $E_i(k) < E_{fm}(k)$, 始态载流子的能量不足以产生碰撞离化;当 $k = k_2$ 时, $E_i(k_2) = E_{fm}(k_2)$, 即在 k_2 下具有阈值能量;当 $k > k_2$ 时, $E_i(k) > E_{fm}(k)$, 即具有大于碰撞离化所需的能量;当 $k > k_3$ 时, $E_i(k) < E_{fm}(k)$, 则不可能发生碰撞离化。注意 k_3 附近 E_i 和 E_{fm} 的情形不同于 k_2 附近 E_i 和 E_{fm} 的情形。正是由于这个

原因, $E_i(\mathbf{k}_3)$ 称为反阈值能量。因此, $\mathbf{k}_2$ 和 $\mathbf{k}_3$ 确定了一个产生电子-空穴对的“窗口”,这是一个有趣的效应,其物理过程可以解释为:一个轻空穴产生两个重空穴(在抛物线型价带内)和一个电子(在抛物线型导带内)(Camphausen 和 Hearn, 1972)。如果阈值能量和反阈值能量十分相近,则有限的电子-空穴对生成“窗口”可以减小碰撞离化过程的截面。

另一个重要情形是可能存在几个阈值。例如,图 2 中 $\mathbf{k} > \mathbf{k}_3$ 的某处, $E_i(\mathbf{k})$ 和 $E_{fm}(\mathbf{k})$ 两条曲线可能再次相交,这个新交叉点称为第二阈值。Anderson 和 Crowell(1972)发现:在 GaAs、Ge、Si、GaP、InSb 等材料中,都存在有多阈值现象,这表明实际有效离化阈值能量与电场有关。简单地说,是载流子分布的高能尾部决定了碰撞离化过程;当电场增强时,此高能尾将向高能方向移动,因而,可以出现几个阈值。

还必须指出,阈值处的碰撞离化也可能是间接过程,或者涉及一个倒格矢(为碰撞过程),或者吸收一个声子。后者的离化能量可能减小,变得可以与带隙相比,因为声子波矢有利于动量守恒(Shockley, 1961)。然而,在这种情形下,产生碰撞离化的条件变得极其苛刻(Anderson 和 Crowell, 1972)。

下面的讨论仅限于直接过程,只考虑最小阈值,并以此最小阈值作为离化阈值能量 E_i 。为了更好地说明阈值能量,首先考虑几种简单的能带模型,分别描述如下。

a. 双抛物带

考虑有效质量分别为 m_e 和 m_h 的导带和价带,根据(6)式表示的阈值条件,求出如下的终态粒子(载流子)波矢关系式:

$$\mathbf{k}_1 = \mathbf{k}_2 = \mathbf{k}_3(m_e/m_h) \quad (7)$$

对于单电子碰撞离化,离化后的总波矢 $\mathbf{K}_f$ 和总能量最小值 E_{fm} 分别为:

$$\mathbf{K}_f = 2\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_3 = \mathbf{k}_1(2 + m_h/m_e) \quad (8)$$

$$E_{fm} = (\hbar^2 k_1^2 / 2m_e)(2 + m_h/m_e) + E_g = E_{i,e} \quad (9)$$

为了能量和动量守恒,导带必须提供一个具有波矢 $\mathbf{k}_i$ 和能量