

摘要

基于对一种新型的近晶格匹配的 In_{0.17}Al_{0.83}N/GaN 异质结构 IMPATT 二极管仿真特性进行了一系列的研究。通过对击穿电压、噪声特性、二极管电场强度比较发现，相对于同质结 GaN 结构的 IMPATT 二极管来说异质结结构的 IMPATT 二极管具有更局部化的雪崩击穿区宽度，并且随着雪崩终止区宽度的增加，电场强度、击穿电压和射频输出功率逐渐减小。

关键词：异质结构、近晶格匹配、IMPATT 二极管

第一章、绪论

1.1、GaN 材料的概述

目前我们所研究的 GaN 一般是一种属于无机物的化学材料，其本质上也是属于化合物材料。这种化合物材料的硬度比较高，和一种纤锌矿的结构比较类似。氮化镓具有比较宽的能带间隙，目前发展中通常应用于功率较大的微型电子器件中。就当下全球在半导体领域的发展来看，GaN 材料在半导体领域的研究仍然是热门和重点，是微型、发光电子元器件研制过程中必备的新型半导体材料。GaN 材料有能量大的原子键、化学性质比较好，一般不同任何酸性物质发生化学反应等性质。另外 GaN 材料的抗辐照性能比较好，基于这些性质，其在大功率器件、频率高的微波器件以及光学微型电子器件方面的应用有着良好广泛的发展前景。

GaN 在一千零五十摄氏度的高温下开始发生化学反应：固态的氮化镓在高温情况下分解为气态的镓和气态的氮气。我们是通过衍射法了解到了 GaN 晶体的晶格类型是六方晶系。在惰性气体中，一千摄氏度下氮化镓会不断地缓慢挥发，显示氮化镓在温度较高的情况下仍然是比较稳定的。而当温度在一千一百三十摄氏度高温时，其蒸汽压会比理论下计算得到数据偏低原因是其内部存在氮化镓的多聚体分子。氮化镓的化学性质稳定，通常不和水发生反应，同时还不和一些酸，例如 HCL、HN₃、H₂SO₄ 反应，即使是浓度低的氢氟酸也不能使氮化镓分解。氮化镓只会在加热的碱性物质中才会溶解。

上述对 GaN 材料的各种分析可知，目前它是企业设计、开发和研制各种高温、大功率光学电子元件和微波光学元件的主要原子材料。目前，随着分子束外延技术在 GaN 材料应用领域方面的深入研究和重要薄膜长成技术领域的突破性发展，我们得到了很多新的氮化镓薄层。以氮化镓材料为基础研制出的各种二极管、三极管、mos 管应用到了很多器件的制备中。基于 GaN 材料的这些特性以及优点，我们可以在某些方面做更深一步的研究讨论。本文所研究讨论的这种 IMPATT 二极管就是由 GaN 材料和另外一种材料 InAlN 组合而成。

1.2、异质结的物理原理及其特性

N1	N+	N2	欧姆接触 N++
----	----	----	-------------

肖特基接触肖特基接触

图 1 异质结构二极管原理图[2]

作为一种特别的 PN 结，半导体的一种异质分子结主要结构是由两层以上各种类型不同的单层半导体薄膜材料和两层薄膜上的复合物材料按一定顺序地通过沉积积放到一个材料衬底上而结合形成的，这些薄膜复合物结在材料的高性能带内和间隙间的大小通常是不一样的。异质结大致可以划分为同形异质结和型异质结主要依据组成异质结的两种单晶材料的导电性和类型作为依据来划分。作为一种非常的接近于理想状态的二极管，异质结二极管有着优越的特性。特别的，经过改变半导体每一层材料的厚度以及每层材料的能带间隙，能够调整二极管交流特性参数。一般情况下构成异质结的要求是：构成的两种或者两种以上的材料要有类似的原子间隙、大致一样的晶格形状以及在膨胀反面相似的特性。目前，我们主要应用外延方法、沉淀以及金属合金的方式制备异质结。

目前的发展看异质结的不同类型和在相对于电压偏置的状态下能带异质结构分析模型有很多种，并且在各自的领域发挥着越来越重要的作用，也正是这些特性使得异质结的研究成为了热点。如果我们采用了宽禁电阻带 n 或 n 型环形半导体和狭窄禁电阻带 n 或 p 型环形半导体相互连接而所形成的一种异质射频结合结构来将其作为一个射频发射结，则采用该类型半导体可以同时获得较高的射频注入电阻比和较好的射频发射驱动效率。

这对本实验所用到的异质结 IMPATT 二极管有重要的意义，以 p 型 gan 与 n 型 inaln 组成的异质结晶体管为例，可以有效地使得晶体管的基区变得大大地减薄，从而可以大大改善晶体管的工作频率和特性，使这样一种结构所制造的双极晶体管被统称为异质结双极晶体管，这种晶体管在微型领域有着大量的使用。而本文所研究的 In_{0.17}Al_{0.83}N/GaN IMPATT 异质结构二极管的原理以及应用前景

83N/GaN 基异质结构 IMPATT 二极管是一种掺杂分布为 n-n-n 的 SDR 结构。通过改变雪崩终止区的三元宽度，来实现同质结与异质结的转换并实现二者的对照比较。

1.3、近晶格匹配的 In_{0.17}Al_{0.83}N/GaN IMPATT 异质结构二极管的原理以及应用前景

我们常见的 IMPATT 二极管一种雪崩二极管，其中的 IMPATT 是碰撞雪崩和渡越时间的英文简写。经过了长时间的发展，至今为止，该器件显示出了负阻特性。IMPATT 二极管一般是当作强大的微波源应用到一些电子元件中。[3] 理想的异质晶体结构材料要求二种结构材料的分子晶体规格氧化常数都相同应尽可能地相互保持匹配。(1)、界面上的悬挂式成键可以充当量子陷阱区域，复合区域附着大量电子和空穴，注入时计算效率大大减小，量子计算效率大大降低。(2)在非接触式晶体中非界面态的线性悬挂式键与非线性辐射式复合，使得晶体量子效率大大降低。(3)有些元件长时间使用可靠性不断减弱，温度波动变化等不良因素容易造成元件故障。

二极管的设计制造与应用性能过程仿真,旨在快速实现低功率噪声、高功率射频信号输出和大功率和高直流-射频信号转换的高效率,近些年以来,经过了以 AlGaIn/GaN 基础的高温、高频、大功率低噪声电子和热迁移率功能晶体管和新型异质热烧结双极功率晶体管的技术研究与应用开发,我们发现基于其具有的大禁带、强自发辐射等比较优越的基本物理特性,其得到了迅速的发展以及压电极化场。然而,由于 AlGaIn 势垒与 GaN 缓冲层之间存在较大的晶格失配(大约为 18%),AlGaIn/GaN 界面仍面临应变诱导可靠性问题。针对这一情况,近晶格匹配的 $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ (其中 x 约等于 0.17)异质结构可以提供两倍以上的 2DEG 片状载流子密度,使得这些问题得到了有效的改善。基于这些优点,本文讨论研究了一种新型 IMPATT 二极管的特性。

1.4、本章小结

本章主要是对本次实验所要研究的近晶格匹配的异质结 IMPATT 二极管的各部分以及组成材料等进行了理论方面的论述。其中对近晶格匹配和异质结特性的研究尤为重要,它们在很大程度上决定了本次实验研究的器件的优势性能。通过对这些组成材料、组成结构、以及结构原理的理解与分析,为后面我们本次实验进一步具体了解该二极管器件在各方面的特点以及优点做了良好的铺垫作用第二章、异质结 IMPATT 二极管的原理以及仿真特性

2.1 碰撞电离雪崩渡越时间二极管的工作原理

IMPATT: 碰撞电离雪崩渡越时间,IMPATT 二极管采用半导体结构的碰撞电离和渡越时间的性质在微波频率下产生来自时域的负阻。这与隧道二极管的负阻不同。本实验研究的二极管有两种延迟使电流滞后于电压,一种是雪崩延迟,另一种载流子渡越时间延迟。[1]

基于该器件的优秀微波特性现在该器件正被应用到各种微波领域的各个方面,而且我们已经能得到持续高功率输出的波段。然而我们研究发现这类集成电路实际设计应用中却还存在两个关键问题亟待解决和值得关注:(1)它的噪声高,对于各种工作环境状态灵敏;(2)它往往具有很大的振荡电抗,此类型的电抗和电路振荡幅度的值之间往往存在着强烈的相互影响并且我们常常要求电路使用者在进行设计这类集成电路的设计时候格外仔细,以便于防止二极管电路发生放电失谐乃至发生烧伤。

2.2、异质结 IMPATT 二极管的仿真软件平台 SILVACO 的使用

2.2.1 SILVACO 软件平台的使用原理

本文的仿真过程利用了 SILVACO 软件平台进行仿真。仿真程序主要由 InAlN/GaN 异质结构 IMPATT 二极管结构的代码部分以及加上电压电流以后 InAlN/GaN 异质结构 IMPATT 二极管的交流特性代码部分。本次实验用到的 SILVACO 软件平台具有仿真方便快捷、软件内含有一些有助于学习的例子、容易调试修改等特点,有助于本实验的快速进行。

通过 SILVACO 软件平台进行各项仿真，可以得到异质结构 IMPATT 二极管的直流以及交流特性曲线。将这些曲线进行分析，可以判断异质结构 IMPATT 二极管相对于同质结构的二极管在哪些方面有优势。

2.2.2 应用 SILVACO 软件平台进行代码编写的具体过程分析

首先本次实验需要应用电脑进行代码仿真得到实验结果即特性曲线图像，通过对 SILVACO 软件进行一定程度的系统性的学习，对于 SILVACO 软件平台有了一定的初步掌握，掌握到程序的结构是如何的、程序该如何搭建、以及如何发现程序的错误并怎样修改等等一些初步工作。之后，可以在 SILVACO 软件平台的 example 窗口内得到很多类似本实验所需结构代码的示例代码，然后通过对这些相关示例的系统性的学习，可以对本次实验所要完成的代码框架的设计有了大致的掌握，便于下一步的完成仿真研究。

下一步便是具体代码的编写过程，首先是器件框架的建立。主要包含：go atlas（直接导入现成的结构文

件）；然后是 mesh（网格开始定义）接着便是 x.mesh loc= xxx spac=xxx y.mesh loc=xxx spac=xxx 这样便把在 x、y 方向上的网格甚至以及网格的密度都能定义完成；再下一步是区域的定义，代码一般是 Region num=xxx x.

min=xxx x.max=xxx y.min=xxx y.max=xxx，这样便将每个区域的大小定义完成了；再往下一步便是电极部分的代码的定义，代码一般为 electrode name=anode top（顶部阳极的定义），electrode name=cathode bottom（底部阴极的定义）；电极定义完毕之后便是杂质分布状态部分代码的定义。具体代码为 doping region=1 uniform n.type conc=xxx（n 型杂质的定义），doping region=2 uniform p.type conc=xxx（p 型杂质的定义）；结构代码的最后一步便是保存以及可视化工具显示，它们的具体代码是 save outfile=想要保存为的文件名，tonypiot 想要保存的文件名。到此，经过上面代码的编写可以先点击运行，如果无误将得到本次实验所需要的二极管的结构。

在上面结构代码部分完成以后，便是要根据本实验所要研究的 In_{0.17}Al_{0.83}N/GaN 异质结构 IMPATT 二极管中前面 InAlN 各个部分参数的代码部分的编写，然后再次运行程序，程序无误的话便可以得到符合本实验所研究二极管的最终结构代码。由于我们还要研究该异质结构 IMPATT 二极管的交流特性，所以接下来就是要在上面代码的基础上进行电流电压代码部分的加入。在此之前还要注意有些参数数据的设置，例如，禁带宽度、电荷效应、碰撞电离系数等。在考虑完这些参数并加入到代码中之后，便可以进一步完善代码，点击运行检查是否有报错，没有报错便会在 tonypiot 的显示栏得到我们想要的电压电流的交流特性曲线。

最后一步便根据这些得到的仿真图像，分析该异质结 IMPATT 二极管的交流特性并分析得到参数性能。下面便是将这些参数与同质结的 IMPATT 二极管做对比，总结得到该异质结 IMPATT 二极管相对于同质结构的优点，便可得到我们想要的实验结果。

2.3 器件结构以及材料参数

2.3.1 器件结构

在本次实验中，主要的研究方法是基于雪崩终止区存在的三元宽度来进行器件结构的划分的。实验的过程中，

我们划分了四个区域，分别是 S0、S1、S2、S3。S0 为一个同质结构的 IMPATT 二极管，其中 N1、N+ 和 N2 是 GaN 材料；而

S1、S2、S3（其三元层宽度依次增大）是近晶格匹配的 In_{0.17}Al_{0.83}N/GaN 异质结 IMPATT 二极管。

2.3.2 材料参数

参数	GaN	InN	AlN
$a_n (cm^{-1})$	1.14×10^7	2.9×10^8	8.9×10^6
$b_n (V cm^{-1})$	2.4×10^7	3.4×10^7	3.76×10^7
$a_p (cm^{-1})$	5.41×10^6	1.34×10^8	5.41×10^6
$b_p (V cm^{-1})$	1.96×10^7	2.03×10^7	3.92×10^7

图 2 GaN, InN, AlN 的 b_p, a_n, a_p, b_n 参数[2]

2.4 本章小结

本章内容主要是实验过程，包含了器件结构的分析设定、参数的设定、软件平台的使用以及最重要的代码部分的编写与运行。通过对本次实验器件结构分析并设定与实验内容相匹配的实验数据，保证实验中的器件参数符合实验要求。最后应用可以对器件进行仿真的软件平台进行代码的编写（此过程需要的时间长并且十分的繁琐，需要经过多次的反复修改、运行、再观察修改），并能够正确运行得到我们接下来分析器件性能所需要的特性曲线。

第三章 IMPATT 二极管静态特性、动态特性、功率和效率和噪声特性的研究

3.1 IMPATT 二极管的静态特性分析

IMPATT 二极管由高场雪崩区加上漂移区组成，它的静态特性主要包含有电场分布、击穿电压和空间电荷效应。

[1]就当下的发展，IMPATT 二极管已经有了许多种类，其中不乏性能十分理想的异质结构二极管并且其发展仍在不断推进，下面我们就以上几个方面来着重分析其静态特性。

3.1.1 电场分布

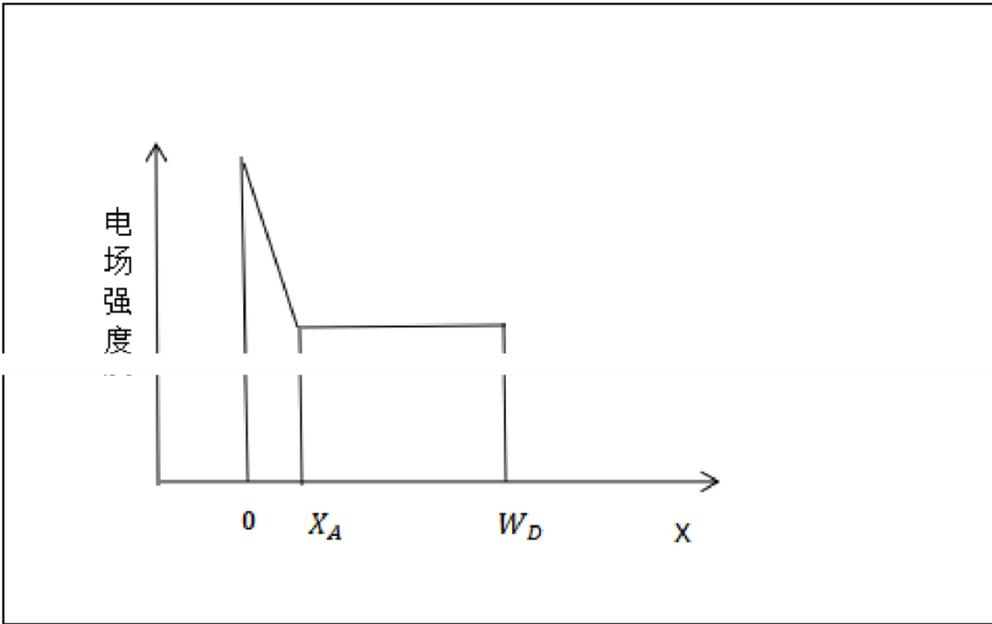


图3 IMPATT 二极管不同区域电场强度的大小

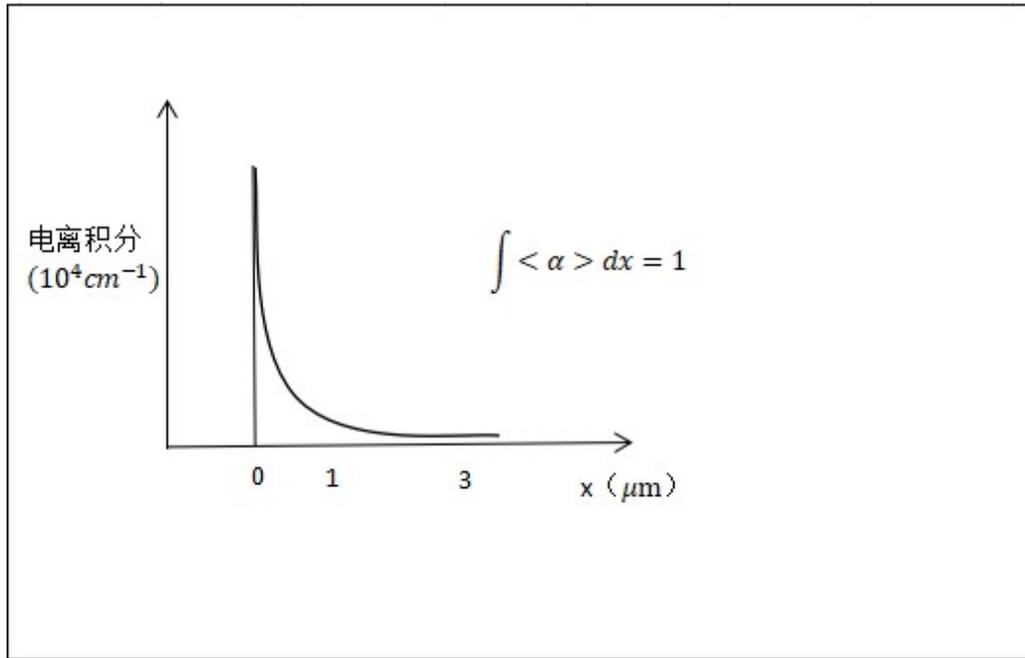
图中 $0 \sim X_A$ 区域为二极管工作在雪崩区的电场强度的分布情况， $X_A \sim W_D$ 区域为 IMPATT 二极管工作在漂移区时电场强度的分布情况。下面我们就本次实验研究的二极管进行具体的数据分析。

经过过去的科研人员的实验，即对大量的二极管在不同大小的电场强度下进行了众多的测试，并总结出来了一个较为准确的结果。通过上述大量的实验数据，我们总结出了发生雪崩击穿所需要的条件为：

$$\int_0^W \langle \alpha \rangle dx = 1$$

。 3-1 电离积分是：

$$\langle \alpha \rangle \equiv \alpha_n \exp \left[- \int_x^{W_D} (\alpha_n - \alpha_p) dx \right], \quad \alpha_n > \alpha_p \quad 3-2$$



图四 IMPATT 二极管在不同区域电离积分大小情况

由图分析可以得到，电离积分在雪崩区比较显著，当进入到漂移区之后，电离积分的大小相对于前面雪崩区显著降低。

然后我们还发现了其中因为 α 强烈地依赖于大量强度大的电场，这个雪崩地带的区域性是高度局部化的。这对本次实验的异质结二极管的电场分析有了重要的公式依据，方便了我们对其在电场以及击穿区域分布等情况有了更好的把握。

3.1.2 击穿电压

下面我们来分析静态特性另外的一个指标：击穿电压。类似于我们经常使用到的计算的方法得到电压，虽然这种方法可能会有一些计算上的误差，但是差别一般都不会太大，而且方便快捷。本次实验也是采用计算的这种方法，通过计算得到二极管击穿电压，即击穿最终也是由电离积分决定的。通过我们用公式得到的电场，就可以大致了解到我们在实际情况下通过测量得到的击穿电压的大小，有利于我们对电路电压的把控。具体的计算公式为：

$$V_B = \frac{1}{2} \varepsilon_m W_D = \frac{\varepsilon_{ss}^2 m}{2qN} \quad (\text{单边}) \quad 3-3$$

$$V_B = \frac{1}{2} \varepsilon_m W_D = \frac{\varepsilon_s s^2 m}{qN} \quad (\text{双边})$$

，式子中 ε_m 为最大电场。而对于里德二极管，击穿电压为

$$V_B = \varepsilon_m W_D = \frac{qNb}{\varepsilon_s} (W_D - \frac{b}{2}) \quad 3-5$$

理想的 IMPATT 二极管击穿是加的反向电压等于 V_B 减去内建势。然而对于实际的 IMPATT 二极管，其内建势通常情况下是可以忽略不计的。

3.1.3 雪崩区和漂移区

理想上雪崩区是整个器件基础层的最大宽度。但是，对于里德二极管和里德 p-n 半导体，电子和空穴的成倍增加的区域仅仅是局限于一些非常紧挨着里德冶金半导体的特殊地方。由我们前面讨论的雪崩击穿条件公式可以知随着 x 的偏差，电离积分的贡献不断变小。因此我们取的 $0-x_A$ 区域也不能完全的代表雪崩区，为了实验更加准确，我们应该取

$$\int_0^{x_A} \langle \alpha \rangle dx$$

$$\int_{-x_A/2}^{x_A/2} \langle \alpha \rangle dx = 0.95 \quad 3-6$$

然而雪崩漂移区又是一个不能计算包括雪崩载流区在内的能量耗尽载流区，漂移区内最重要的一个移动参数其实就是电子和空穴通过漂移的移动速度。

3.1.4 温度以及空间电荷效应

IMPATT 二极管还具备其他两个重要的静态下的特性，分别是温度和空间区域的电荷特性。上面讨论的击穿电压和最大电场都是在室温全等温状态下没有空间电荷效应并且不存在振荡时计算出来的。然而在正常使用情况下，impatt 二极管会产生偏置现象，而偏置现象带来的最大问题是结的温度会明显的不能达到理想情况。载流子的电离率可以随着温度的上升逐渐[5]，因此，对于一个给定的掺杂分布 impatt 二极管，击穿的电压就会和温度形成正比关系。

但是温度同时还会带来一些负面的影响，最常见的就是温度过高将器件烧坏等永久性的伤害是的器件报废无法工作。在实际的实验过程中要注意温度的把控。

而空间电荷效应主要影响的是耗尽层内的电场大小变化情况，同时还会形成电阻，进而影响了空间电荷的限制电流

$$I = Aq\Delta n v_s \quad 3-8$$

3.2 IMPATT 二极管的动态特性分析

3.2.1 注入相位延时和渡越时间效应的影响分析

在讨论动态特性时，我们从本实验研究的器件的注入相位延迟和渡越时间效应开始着手，下图是我们给出该器件的图形，

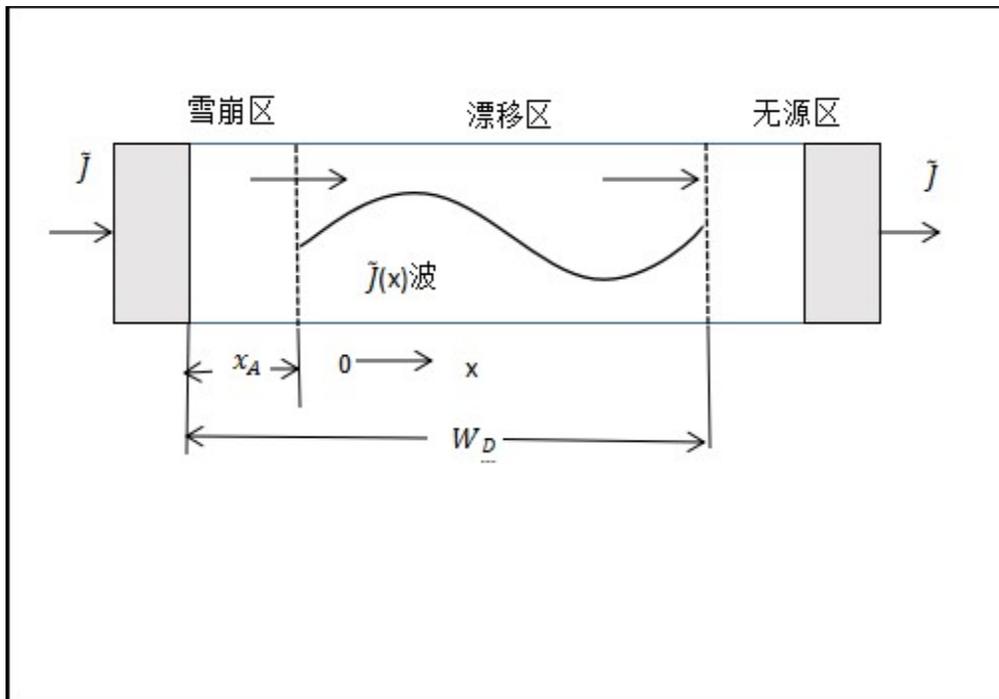




图五 理想 IMPATT 二极管

x 轴的点位于雪崩区(电荷注入平面)。该图还分别显示了输入与输出端的电压与雪崩所产生的效率之间的关系。输入端的电压的平均值与雪崩区的击穿电压大致相等。在前一半区域,雪崩区击穿电压的成倍增大。但是我们观察发现,电子空穴的产生情况不与加在区域的电场强度和电压大小保持相同。其中主要是因为载流子的产生率不仅仅只与电场有关系,还与电子和空穴的数量有一定关系。

3.2.2 小信号特性的分析



图六 IMPATT 二极管的划分模型

我们用里德二极管来大致地表述 impatt 异质结二极管的小信号特性,通过分析可以把其划为三个区域:分别是雪崩区、漂移区和无源区。impatt 二极管在这三个区域的小信号特性是不相同的,在实验中要特别注意划分的尺寸大小。

下面我们就这三个区域进行具体分析。雪崩区:小信号情况下的直流电流为:

$$J_0 = \frac{J_s}{1 - \int_0^W D \langle \alpha \rangle dx}$$

3-9

漂 移 区 阻 抗 为 :

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/476050015053011001>