



ᠨᠢᠮᠤᠯᠠ ᠨᠣᠷᠠᠯ ᠤᠨᠢᠰᠤᠨᠠ ᠶᠤᠨᠢᠰᠤᠨᠠ
内蒙古师范大学
 INNER MONGOLIA NORMAL UNIVERSITY

ᠨᠢᠮᠤᠯᠠ ᠨᠣᠷᠠᠯ ᠤᠨᠢᠰᠤᠨᠠ ᠶᠤᠨᠢᠰᠤᠨᠠ
 ᠨᠢᠮᠤᠯᠠ ᠨᠣᠷᠠᠯ ᠤᠨᠢᠰᠤᠨᠠ ᠶᠤᠨᠢᠰᠤᠨᠠ
 (Qanhuoqin)

本科毕业论文（设计）

批注 [物理系1]: 华文新魏, 小初, 加粗居中

中文论文题目

批注 [物理系2]: 黑体小2, 加粗居中

英文论文题目

批注 [物理系3]: 英文 Times New Roman, 小2, 加粗居中

学院名称:

物理与电子信息学院

批注 [物理系4]: 黑体四号, 加粗

专业、年级:

批注 [物理系5]: 楷体四号

作者姓名:

作者学号:

指导教师:

年 月 日

批注 [物理系6]: 宋体4号

毕业论文原创性声明

批注 [物理系7]: 黑体小二, 固定值
20 磅, 段后 1 行, 居中,

本人所提交的毕业论文“***”，是在指导教师***老师的指导下，独立进行研究工作所取得的原创性成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中标明。

本声明的法律后果由本人承担。

批注 [物理系8]: 宋体小四, 首行缩进
2 个字符, 行间距 1.5 倍

论文作者（签名）：

年 月 日

指导教师确认（签名）：

年 月 日

批注 [物理系9]: 右对齐

摘 要

考虑了纤锌矿结构材料的各向异性造成的内建电场的作用，计算了 GaN/GaAlN 量子阱内电子的激发态极化，结果表明电子偶极矩改变随 Al 浓度非线性减小。一般情况下激发态极化产生的电场强度远小于内建电场，故可忽略不计。但当 n 取较大的值 ($n = 10^{19} / \text{cm}^3$ 以上) 时，即材料被重掺杂时，激发态极化产生的电场强度对内建电场的影响不可忽略。

关键词：量子阱；内建电场；激发态极化

批注 [物理系10]: 黑体三号，居中。
字间空四格，下面空一行。行间距 20 磅

批注 [物理系11]: 宋体小四，行间距 20 磅，首行缩进两个字符

批注 [物理系12]: 黑体四号，左对齐，段前 0.5 行，

批注 [物理系13]: 宋体，小四，3-5 个

目 录

1 引言.....	1
1.1 二级标题.....	1
2 理论.....	2
3 结果与讨论.....	3
4 小结.....	4

批注 [物理系14]: 三号黑体, 中间空四个空格, 下面空一行, 行间距固定值 22 磅

批注 [物理系15]: 宋体小四

GaN/AlN 量子阱中电子的激发态极化

批注 [物理系16]: 黑体小二, 居中, 1.5 倍行间距

杨某某 (学号: 200012054)

批注 [物理系17]: 宋体四号, 居中, 1.5 倍行间距

(物理与电子信息学院 物理学专业 2000 级汉班, 内蒙古 呼和浩特 010022)

批注 [物理系18]: 宋体五号, 居中, 1.5 倍行间距

指导教师: 郭某某

批注 [物理系19]: 宋体四号, 居中, 1.5 倍行间距

1 引言

批注 [物理系20]: 一级标题, 黑体, 小四, 前面空一行, 段前段后 0.5 行, 行间距 22 磅

1.1 二级标题

批注 [物理系21]: 二级标题, 黑体小四, 段前段后 0.5 行, 行间距单倍行距。(是否出现二级标题视情况而定)

III-N 和 III-V-N 化合物半导体材料 (如 AlN、GaN、InN、AlGaIn, GaInN) 具有单轴异性结构, 它的能带结构、光学性质不同于硅与砷化镓, 具有奇特的性质。近年来 GaN 基量子阱已经被成功应用到蓝、绿光和紫外光激光二极管。在 GaN 基量子阱材料中人们尤其对 GaN-GaN 量子阱系统有浓厚兴趣, 因为这种量子阱的限制层为二元合金 GaN, 它的生长已经能够很好地控制, 其材料参数也已经能够很好确定, 另外势垒层 AlGaIn 材料的生长也要比 InGaIn 容易。

批注 [物理系22]: 正文宋体小四, 首行缩进 2 个字符, 行间距 22 磅

关于 III-V-N 化合物量子阱的研究已有很多成果, 其中之一是发现 III-V-N 化合物量子阱中存在内建电场 (internal electric field, 缩写为 IEF), 使电子空穴分离, 从而造成激子结合能下降^[1-4]。进一步的研究说明 IEF 是由于量子阱两种材料的压电极化和随机极化共同形成的界面电荷积累造成的^[3,4]。GaN/AlN 量子阱中内建电场的强度 F 很大, 典型值是 $F=1 \text{ MV/cm}$ ^[5], 例如对于 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ 合金 $x=0.27$ 时 $F=1.1 \text{ MV/cm}$ 。研究表明当 x 不大于 0.27 时, F 随 x 线性增加。对于 $x=0.15$, $F \approx 350 \sim 450 \text{ kV/cm}$; 对于 $x=0.27$, $F \approx 1 \sim 1.1 \text{ MV/cm}$ 。这里我们在 $x=0.15$ 和 $x=0.27$ 时分别取 $F=450 \text{ kV/cm}$ 和 $F=1.1 \text{ MV/cm}$; 对于其它 x 区间的 F 值我们取为 $x=0.15$ 和 $x=0.27$ 两点 F 值的线性插值。

批注 [物理系23]: 参考文献标注在右上方

由于内建电场的存在, 量子阱中的载流子实际上被限制在三角势阱中。在强光照射下, 阱中电子将被激发。由于三角势阱的非对称性, 处于激发态的电子的电荷中心与基态时相比会有一定偏离, 造成激发态极化。关于 GaN/AlN 量子阱中电子的激发态极化的研究目前的工作很少。文[6]利用改进的渐进递推矩阵方法数值求解阱中电子的薛定谔方程, 得到电子波函数, 并在此基础上研究电子从基态跃迁到第一激发态产生的偶极矩改变以及液体静压力对电子激发态极化

批注 [物理系24]: 数值与单位之间空一格

的影响。文[6]的结果表明电子偶极矩的改变随 Al 的浓度 x 变化不是单调的，这一结果很难解释。由于文[6]只计算了 x 取三个值处的偶极矩，难以得到偶极矩的改变随 Al 浓度 x 总体变化的趋势，所以有必要进一步研究；另外，我们希望知道这种激发态极化反过来会不会对内建电场产生重要影响。我们认为文[6]中得到的偶极矩的改变随 Al 浓度 x 非单调变化的结果是其计算中数值精度达不到要求造成的。本文将利用艾里函数^[7]，解析求解电子波函数及其能量，并在此基础上研究电子由基态跃迁到第一激发态时产生的偶极矩改变及其随 Al 浓度的变化。结果表明由于电子激发态极化产生的偶极矩改变随 Al 的浓度 x 的增加非线性减小。

2 理论

考虑 GaN 被 n 型掺杂的情况，这时强光激发的电子浓度远大于空穴浓度，所以我们可以只需考虑电子的激发态极化。在有效质量近似下，考虑量子阱中一个具有电荷 $-e$ ($e = 1.602 \times 10^{-19} \text{C}$ 为电子电荷量) 且有效质量为 m^* 的电子 (GaN 的电子有效质量为 $m^* = 0.2m_0$)。选择 z 轴为垂直界面方向。量子阱内建电场的强度为 F ，不失一般性，我们假设 IEF 只限于阱内，且在阱内是均匀的并在阱内空间产生线性变化的势场，这样，我们可把量子阱近似看成是三角形的。设电子在三角势中的波函数为 $\zeta_i(z)$ 。电子在三角势阱中波函数满足的薛定谔方程为

$$\frac{d^2 \zeta_i}{dz^2} + \frac{2m^*}{\hbar^2} [E_i + e(-Fz)] \zeta_i(z) = 0 \quad (1)$$

批注 [物理系25]: 公式行间距 1.5 倍, 小四居中

解此方程求得的电子波函数为^[7]

$$\zeta_i(z) = A_i \left\{ (2m^* eF / \hbar^2)^{1/3} \left[z - (E_i / eF) \right] \right\} \quad (2)$$

批注 [物理系26]: 公式编号, 右对齐

对应的能量为

$$E_i \approx (\hbar^2 / 2m^*)^{1/3} \left[\frac{3}{2} \pi eF \left(i + \frac{3}{4} \right) \right]^{2/3} \quad (3)$$

对应的电荷中心为

$$\bar{z}_i \approx 2E_i / 3eF \quad (4)$$

偶极矩改变为

$$\delta\mu = e(\bar{z}_1 - \bar{z}_0), \quad (5)$$

其中 $A_i(x)$ 为艾里函数

$$A_i(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^\infty \cos\left(\frac{u^3}{3} + ux\right) du \quad . \quad (6)$$

则总电偶极矩改变为

$$\Delta p = n\delta\mu \quad . \quad (7)$$

这里 n 为处于激发态中杂质的浓度。激发态极化产生的电场强度的大小为

$$E = \frac{\Delta p}{\epsilon_0} \quad , \quad (8)$$

其方向与内建电场强度 F 的方向相反。

3 结果与讨论

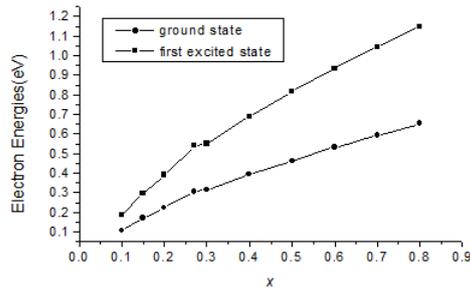


图 1. 电子两个低能态能量随 Al 浓度的变化

批注 [物理系27]: 宋体小四, 1.5 倍行间距, 居中对齐

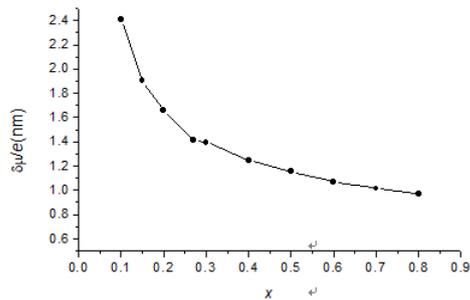


图 2. 电子偶极矩改变随 Al 浓度的变化

批注 [物理系28]: 需要空一格

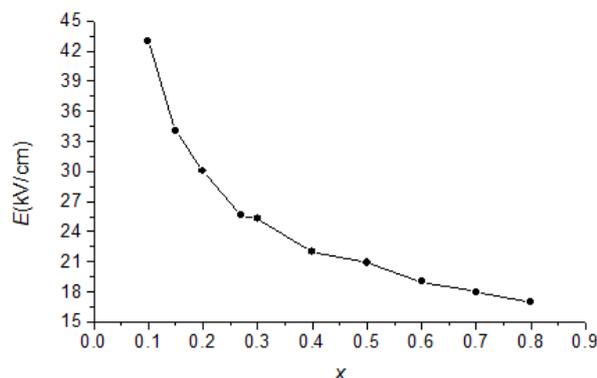


图 3. 激发态极化产生的电场强度的大小随 Al 浓度的变化

图 1 和图 2 示出电子两个低能级以及电子由基态跃迁到第一激发态产生的偶极矩的改变随 Al 浓度的变化情况, 图 1 和图 2 说明 Al 浓度对电子激发有重要影响。由图 1 可知随 Al 浓度的增加电子两个低能级非线性增加。由图 2 可知随 Al 浓度的增加电子由基态跃迁到第一激发态产生的偶极矩的改变非线性减小, 这与文[6]的结果不同。原因如下: 由于的 AlN 禁带宽度为 6.2 eV, 比 GaN 的禁带宽度 3.4 eV 大得多, Al 组分增加使得 $Ga_{1-x}Al_xN$ 异质界面处导带不连续增大^[8], 势阱变深。同时, Al 组分的增加导致的极化电荷使界面附近层内建电场按比例增强, 量子阱底部变窄, 所以两电子最低的能级离量子阱底的高度增加, 且波函数分布变窄, 电荷中心移动幅度较小, 造成偶极矩变化随 Al 浓度增加而减小。

为讨论电子激发态极化产生的电场强度对内建电场的影响我们作出电子激发态极化产生的电场强度随 Al 浓度的变化 (图 3)。由图 3 可知随 Al 浓度的增加激发态极化产生的电场强度的大小非线性减小。这里我们取 $n = 10^{17} / \text{cm}^3$ 。由图 3 可知一般情况下激发态极化产生的电场强度远小于内建电场, 故可忽略不记。但当 n 取更大的值时, 即材料被重掺杂时, 激发态极化产生的电场强度对内建电场影响不可忽略。

4 小结

在三角势阱近似下我们用艾里函数给出了电子在 GaN-GaAlN 量子阱中薛定谔方程的解, 讨论了电子由基态跃迁到第一激发态时偶极矩的改变, 以及两个最低的能级随 Al 浓度变化的情况。结果表明, 随 Al 组分增加, 导带不连续增大,

量子阱变深且变窄，对电子的限制作用增强，子能级离量子阱底的高度增加且波函数分布变窄，造成偶极矩变化随 Al 浓度改变非线性减小。一般情况下激发态极化产生的电场强度远小于内建电场，故可忽略不记。但当 n 取更大的值（ $n = 10^{19}/\text{cm}^3$ 以上）时，即材料被重掺杂时，激发态极化产生的电场强度对内建电场影响不可忽略。

参考文献：

- [1] Guo Zi-zheng, Liang Xi-xia, Ban Shi-liang. Type-II Excitonic Characteristics of The GaN/GaN Wide Quantum Well[J]. 光电子激光, 2002, 13(12): 1303-1310.
- [2] 吴晓薇, 郭子政, 阎祖威. GaN/GaN 量子阱中电子的激发态极化及其压力效应 [J]. 量子电子学报. 2005, 22(1): 75-80.
- [3] 孙玉文. 汉语变调构词研究[D]. 北京: 北京大学出版社, 2000.
- [4] 顾炎武. 昌平山水记; 京东考古录[M]. 北京: 北京古籍出版社, 1982.

- 批注 [物理系29]: 黑体五号, 前面空一行
- 批注 [物理系30]: 外文期刊
- 批注 [物理系31]: 中文期刊
- 批注 [物理系32]: 硕博论文
- 批注 [物理系33]: 书籍

(参考文献请在正文中相应位置, 以“上标”的形式标出)

参考文献引用格式请按照 GB/TB7714-2005 《文后参考文献著录规则》进行, 相关链接如下:

- <https://wenku.baidu.com/view/3103b9b750e2524de5187e8f.html?sxts=1544924509656>
- <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1600772143131491817&wfr=spider&for=pc>

(英文摘要不必另起一页, 直接跟在参考文献后面即可)

The Polarization of Electronic Excited State in a GaN/GaN Quantum Well

Yang Ruifang (Student ID: 200012054)

(Class of Physics Han, Grade 2000, College of Physics and Electronic Information, Inner Mongolia Normal University, Hohhot, Inner Mongolia 010022)

Director: Guo Zizheng

Abstract: The build-in internal electric field caused by the anisotropy of wurtzite structure has been considered. The polarization of the electric excited state in the GaN/GaN quantum well has been calculated. It is shown that the moments of dipole change decrease with Al content non-linearly. The effect of the polarization of the electronic excited state on the build-in internal

- 批注 [物理系34]: 小二, 居中, 加粗, 单倍行距
- 批注 [物理系35]: 四号, 居中, 前面空一行, 行间距固定值 20 磅
- 批注 [物理系36]: 小四, 居中, 单倍行距
- 批注 [物理系37]: 四号, 居中, 单倍行距
- 批注 [物理系38]: 加粗, 五号
- 批注 [物理系39]: 五号

electric field is neglected when the density of the doped electron n is small but when n is above $10^{19}/\text{cm}^3$ it is not neglected.

Key words: quantum well; build-in internal electric field; the polarization of excited state

批注 [物理系40]: 加粗, 五号

致 谢

批注 [物理系41]: 黑体三号, 居中,
下面空一行, 中间四个空格

大学生活.....

批注 [物理系42]: 楷体四号, 行间距
固定值 22 磅

注意：

1、全文的字母和数字均应该为 Time New Roman（新罗马）字体。

2、（同时请同学们注意页边距的设置，如下面所示）。



3、从首页到正文页之间按罗马数字（I、II.....）标号（首页封皮不标页码）；正文从数字 1 开始标号，Time New Roman 小五。

4、从正文开始加页眉，页眉内容为：论文题目（居中，宋体小五）。

5、参考文献中文宋体五号，英文和数字 Time New Roman 五号。

6、图片均使用 tif 或 jpg 格式

7、数字与单位之间空一格