

# 3 MeV 质子辐照对 AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管的影响

吕玲<sup>†</sup> 张进成 李亮 马晓华 曹艳荣 郝跃

(西安电子科技大学微电子学院, 宽禁带半导体材料与器件教育部重点实验室, 西安 710071)

(2011 年 4 月 26 日收到; 2011 年 7 月 7 日收到修改稿)

研究了 AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管 (HEMT) 的质子辐照效应. 在 3 MeV 质子辐照下, 当辐照剂量达到  $1 \times 10^{15}$  protons/cm<sup>2</sup> 时, 漏极饱和电流下降了 20%, 最大跨导降低了 5%. 随着剂量增加, 阈值电压向正向漂移, 栅泄露电流增加. 在相同辐照剂量下, 1.8 MeV 质子辐照要比 3 MeV 质子辐照退化严重. 从 SRIM 软件仿真中得到不同能量质子在 AlGaIn/GaN 异质结中的辐射损伤区, 以及在一定深度形成的空位密度. 结合变频  $C-V$  测试结果进行分析, 表明了质子辐照引入空位缺陷可能是 AlGaIn/GaN HEMT 器件电学特性退化的主要原因.

**关键词:** 质子辐照, AlGaIn/GaN HEMT, SRIM, 空位密度

**PACS:** 72.80.Ey, 73.40.Kp, 14.20.Dh

## 1 引言

GaN 是一种直接带隙宽禁带半导体, 通常为纤锌矿结构, 室温下禁带宽度为 3.4 eV. 它具有优异的物理性质和化学性质, 在光电子、高温大功率器件和高频微波器件应用方面有广阔的前景, 航天、核工业、军用电子等特殊环境对这种器件有着迫切的需求. AlGaIn/GaN 异质结构最重要的优点就是大的能带断续以及材料本身的极化效应, 使得在这种异质结构中形成二维电子气 (2DEG), 可以同时提高电子浓度和电子迁移率之间的矛盾. 基于异质结的高电子迁移率晶体管 (HEMT) 在大功率器件方面有非常好的应用前景.

国内外已经有很多研究关注 GaN 基器件的抗辐照效应, 并取得一定的成绩. 空间中的器件主要是受到粒子和电磁辐射, 像电子、质子、中子、 $\gamma$  射线等<sup>[1]</sup>. 目前主要关注的是质子辐射和  $\gamma$  射线辐射, 用来模拟近地轨道的空间环境, 评估该器件在未来卫星设备中的应用前景. 辐照效应主要是分为电离效应和位移效应. 对于化合物半导体, 辐射主要引起位移损伤效应. GaN 基器件

的抗辐照特性明显优于 Si 和 GaAs 基器件. 这是因为 GaN 原子位移阈能比 GaAs 高. 材料原子位移阈能与晶格常数成反比, 对于纤锌矿结构 GaN 为  $a = 0.319$  nm,  $c = 0.519$  nm; 而 GaAs 晶格常数为  $a = 0.56419$  nm<sup>[2]</sup>.

为了更好地预估器件在空间环境中的运行情况, 很有必要清楚器件在辐射环境中的退化机制. 早先的研究中, Aktas 等将 AlGaIn/GaN HEMTs 置于氮气氛围下 <sup>60</sup>Co 源中, 最大剂量达到 600 Mrad<sup>[3]</sup>. 实验结果发现, 器件电学特性几乎不变, 有着很强的抗辐照特性, 表明了电离效应对 GaN 器件影响很小<sup>[4]</sup>. Hu 等用 1.8 MeV 质子辐照 AlGaIn/AlN/GaN HEMTs, 剂量达到  $1 \times 10^{15}$  protons/cm<sup>2</sup> 和  $3 \times 10^{15}$  protons/cm<sup>2</sup> 时, 漏极最大饱和电流分别下降了 50% 和 80%, 最大跨导分别下降了约 20% 和 55%<sup>[5]</sup>. Kim 等研究 17 MeV 质子辐照 AlGaIn/GaN HEMTs, 最大剂量达到  $2 \times 10^{16}$  protons/cm<sup>2</sup> 时, 漏极最大饱和电流下降 43%, 最大跨导下降 29%<sup>[6]</sup>. 研究发现器件参数退化随质子能量增加没有呈现出越来越严重的趋势.

<sup>†</sup> E-mail: ling.lv.xidian@hotmail.com

本文主要研究质子辐照在 AlGaN/GaN HEMT 器件中引起的位移损伤效应. 对于足够高能量的粒子, 在弹性或者非弹性核碰撞时, 被转移的能量可以大到足以撞击一个原子使它离开自己的晶格位置, 由此在原有位置上形成一个空位. 这个缺陷中心可以通过载流子的复合和载流子去除, 降低 2DEG 载流子浓度; 也可以通过 Coulomb 散射降低载流子的迁移率.

SRIM 软件基于 Monte Carlo 方法, 是目前国际上通用的计算带电粒子在靶材料中入射和能量传递的计算程序. 通过模拟入射质子和 GaN 之间的交互作用来分析确定 GaN 的质子辐照损伤机制和辐照损伤区 [7].

先前的研究比较注重实验结果, 本文中我们拟从理论上进行详细地分析. 采用 3 MeV 能量的质子对 AlGaN/GaN HEMT 器件进行辐照, 结合 SRIM 软件仿真对实验结果和相关文献中的结果进行对比, 讨论质子辐照效应退化机制.

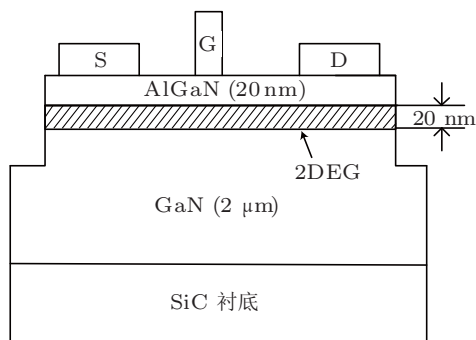


图1 典型的 AlGaN/GaN HEMT 器件结构示意图 (S 是源极, D 是漏极, G 是栅极, 2DEG 表示异质结界面二维电子气)

## 2 辐照实验与结果

采用金属有机物化学气相沉积法 (MOCVD) 生长 AlGaN/GaN 异质结. 在 SiC 衬底上, 主要依次生长约 2 μm 厚的 GaN 层和 20 nm 厚的 AlGaN 层. AlGaN 层的 Al 摩尔组分为 30%. HEMT 器件制造工艺主要包括等离子体刻蚀 (ICP) 进行台面隔离, 栅极 Schottky 接触, 漏、源极 Ohm 接触, 加厚电极以及钝化. Schottky 接触主要是采用电子束蒸发约 20 nm/20 nm 厚的 Ni/Au. Ohm 接触采用电子束蒸发依次为 20 nm/120 nm/55 nm/45 nm 厚的 Ti/Al/Ni/Au 多层金属, 并且在 830 °C 下氮气氛围中快速退火 30 s. 器件栅长为 0.6 μm, 栅宽

为 100 μm. 图 1 为典型的 AlGaN/GaN HEMT 器件结构示意图.

AlGaN/GaN HEMT 器件的质子辐照实验是在北京大学重离子物理研究所进行的. 质子能量为 3 MeV, 辐照剂量分别为  $6 \times 10^{13}$ ,  $4 \times 10^{14}$  和  $1 \times 10^{15}$  protons/cm<sup>2</sup>. 采用 HP4156B 精密半导体参数分析仪测试辐照前后器件的直流特性, 所有的辐照和测试均在室温下进行. 辐照结束立即进行测试, 间隔时间在 20 min 以内.

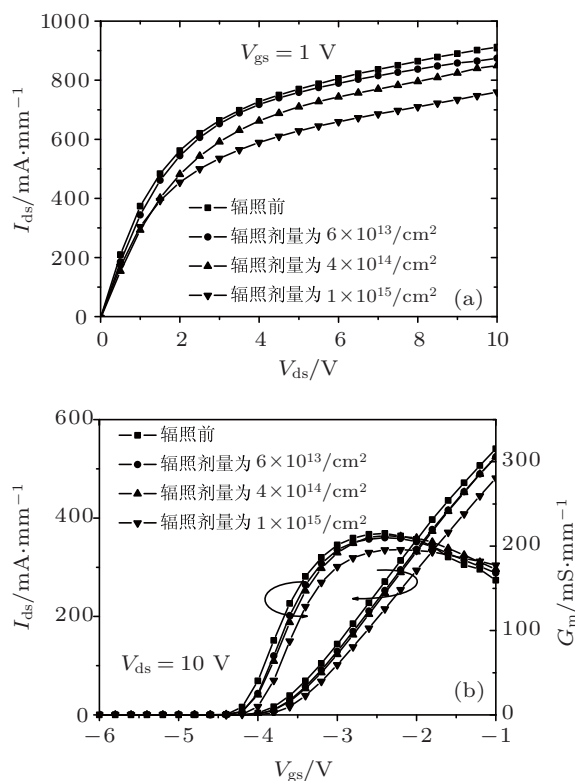


图2 AlGaN/GaN HEMT 器件质子辐照前后不同剂量下输出特性 (a) 和转移特性 (b)

图 2 给出了 AlGaN/GaN HEMT 器件在 3 MeV 质子辐照前后输出特性和转移特性变化曲线. 图中  $V_{ds}$  表示漏电压,  $V_{gs}$  表示栅电压,  $I_{ds}$  表示漏电流,  $G_m$  表示跨导. 随着辐照剂量增加, 器件电学特性逐渐退化, 这个结果与先前的研究相一致 [8,9]. 从图 2(a) 中可知,  $V_{gs}$  为 1 V 情况下, 当辐照剂量达到  $6 \times 10^{13}$  protons/cm<sup>2</sup> 时, 器件电学特性几乎没有变化; 当辐照剂量达到  $1 \times 10^{15}$  protons/cm<sup>2</sup>, 输出特性曲线有明显的退化. 提取饱和漏电流  $I_{dsat}$ , 当辐照剂量达到  $4 \times 10^{14}$  protons/cm<sup>2</sup> 和  $1 \times 10^{15}$  protons/cm<sup>2</sup> 时,  $I_{dsat}$  分别下降了 5% 和 20%. 图 2(b) 是在  $V_{ds}$

为 10 V 时测试得到. 因为此器件是耗尽型器件, 所以阈值电压  $V_{th}$  是负值. 随着辐照剂量增加, 漏电流减小, 阈值电压朝着正向漂移. 提取最大跨导  $G_{max}$ , 当辐照剂量达到  $1 \times 10^{15}$  protons/cm<sup>2</sup> 时,  $G_{max}$  下降了 5%. 与饱和电流退化相比较, 最大跨导退化不是很明显. 综上所述, 器件特性退化只有在辐照剂量比较高时才会比较严重.

图 3 给出了 AlGaIn/GaN HEMT 器件在 3 MeV 质子辐照前后栅漏 Schottky 二极管正向和反向  $I_g$ - $V_g$  特性变化. 图中  $V_g$  表示栅漏电压,  $I_g$  表示栅漏电流. 可以看出,  $1 \times 10^{15}$  protons/cm<sup>2</sup> 剂量的质子辐照可以引起器件栅泄露电流的增加. 质子辐照导致在材料禁带和金属/AlGaIn 界面附近引入缺陷, 这些缺陷可以作为隧穿中心, 增大了栅电流的隧穿几率, 降低 Schottky 势垒高度 [10].

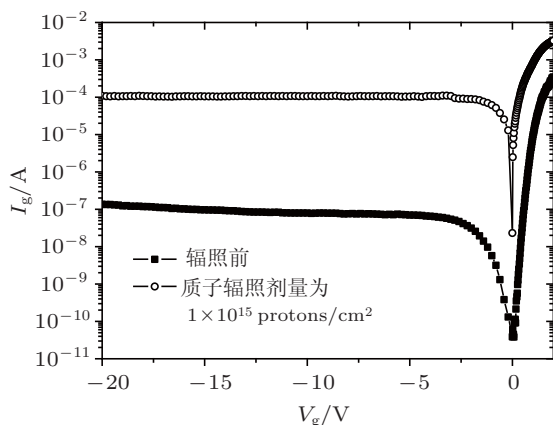


图 3 质子辐照前后 AlGaIn/GaN HEMT 器件栅漏二极管正向和反向特性

### 3 理论分析

#### 3.1 质子在弹性碰撞中传递给 Ga,N 原子的能量

选取 GaN 厚度为 2 μm, 质子能量为 10 keV—10 MeV. 质子辐照下, 辐照损伤来源于质子和 GaN 交互作用, 即入射质子在沿其运行路径上把能量传递给晶格中的 Ga, N 原子, 而其自身却随着能量的衰减速度逐渐减小而慢化, 直至最后损失全部能量而停留在靶材料中. 从辐照损伤效应来看, 质子和 GaN 的交互作用主要有电离和位移两种形式: 电离是入射质子与 GaN 的核外电子发生非弹性碰

撞而使电子脱离原子核束缚成为自由电子的过程, 其辐射损伤主要表现为在 GaN 材料中引入过剩的空穴和电子密度; 位移是入射质子与 GaN 的原子核发生碰撞而使 Ga, N 原子脱离原有位置的过程, 其辐照损伤表现为在 GaN 中产生空位、间隙原子、Frenkel 对、双空位或空位/杂质原子对等. 质子辐照下, GaN 的辐照损伤是以电离效应为主还是位移效应为主, 均与质子传递给 GaN 晶格原子的能量有关, 只有传递能量大于 Ga, N 原子的位移阈值能时, 才能产生位移损伤.

根据能量和动量守恒定律, 质子传递给晶格原子的能量为

$$E_t = \frac{4M_P M_t}{(M_P + M_t)^2} E_P \cos^2 \phi, \quad (1)$$

其中,  $E_t$  为质子传递给晶格原子的能量,  $E_P$  为入射质子的能量,  $M_P$  为质子的质量,  $M_t$  为晶格原子的质量,  $\phi$  为晶格原子的反冲角.  $\phi = 0^\circ$  时, 质子在弹性碰撞中传递给 Ga, Al, N 原子的最大能量为  $E_{t \max}(\text{Ga})$ ,  $E_{t \max}(\text{Al})$  和  $E_{t \max}(\text{N})$ .

质子质量为  $M_P = 1.67 \times 10^{-27}$  kg, Ga 原子的质量为  $M_{\text{Ga}} = 1.158 \times 10^{-25}$  kg,  $M_{\text{Al}} = 2.99 \times 10^{-26}$  kg, N 原子的质量为  $M_{\text{N}} = 2.326 \times 10^{-26}$  kg.

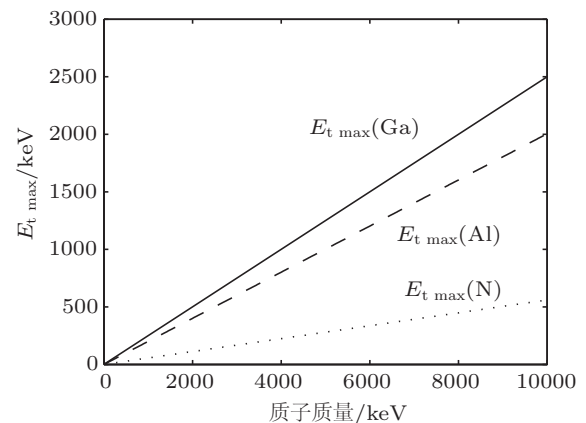


图 4 不同能量的质子转移给 Ga, Al, N 原子的最大能量

由图 4 可以看出, 弹性碰撞中质子传递给 Ga(Al), N 原子的最大能量都是随着质子能量的升高而线性增大. 对于 Ga(Al), N 原子位移阈能, 有报道  $E_d(\text{Ga}) \approx 22 \text{ eV} \pm 1 \text{ eV}$ ,  $E_d(\text{Al}) \approx 24 \text{ eV}$ ,  $E_d(\text{N}) \approx 25 \text{ eV} \pm 1 \text{ eV}$ . 由此可见, 弹性碰撞中 3 MeV 质子传递给 Ga(Al), N 原子的最大能量远大于位移阈能, 满足位移效应发生的必要条件.

### 3.2 辐射损伤区

辐照损伤区是材料辐照效应研究中的重要内容,入射粒子在靶材料中的终止位置及其在入射方向上的投影射程可以直观地反映材料的辐照损伤区.图5给出不同能量的质子在 GaN 材料中的射程.在 10—200 keV 能量范围内,质子在 GaN 中的平均投影射程及其与质子能量关系线性拟合的结果为

$$R_P = 40.97 + 5.35E_P, \quad (2)$$

式中,  $R_P$  为射程,  $E_P$  为入射质子能量.

随着质子能量的增加,射程逐渐增大.与 1.8 MeV 质子辐照相比,3 MeV 质子辐照在 GaN 材料中的射程更远.对于 AlGaIn/GaN 异质结来讲,3 MeV 质子辐照的辐射损伤区离异质结界面更远,而异质结界面是影响 HEMT 器件特性的关键区域.所以,3 MeV 质子辐照对器件损伤效应应该更小些.从实验结果看,在相同辐照剂量下,1.8 MeV 质子辐照 AlGaIn/GaN HEMT 器件退化更为严重,从实验结果证明了上述观点.

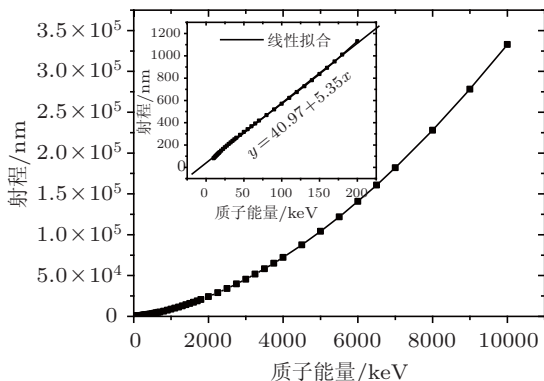


图5 不同能量的质子在 GaN 中的平均投影射程

### 3.3 空位缺陷的计算

带能量质子将一部分动能转移到晶格原子上,通过非电离能量损失 (NIEL) 使得晶格原子发生位移,进而形成带电缺陷中心.我们认为:这个带电缺陷中心是使得材料和器件参数特性发生一定退化的主要原因. GaN 材料中,我们可以通过软件计算出 Ga 空位和 N 空位的密度.

SRIM 软件中计算空位的原理如下.

假设入射离子原子序数为  $Z_1$ , 能量为  $E$ , 碰撞后能量变为  $E_1$ ; 靶原子的原子序数为  $Z_2$ , 碰撞后能

量由 0 变为  $E_2$ .

1) 当  $E_2 > E_{disp}$ , 靶原子位移.

若  $E_1 > E_{disp}$  且  $E_2 > E_{disp}$ , 产生空位, 两者都有足够能量离开晶格位置. 在下次碰撞之前, 靶原子能量变为  $E_2 - E_{latt}$ .

若  $E_1 < E_{disp}$  且  $E_2 > E_{disp}$ ,  $Z_1 = Z_2$ , 产生替位, 入射粒子  $Z_1$  取代靶原子的位置,  $E_1$  以声子形式释放.

若  $E_1 < E_{disp}$  且  $E_2 > E_{disp}$ ,  $Z_1 \neq Z_2$ , 入射粒子  $Z_1$  变为间隙原子.

2) 当  $E_2 < E_{disp}$ , 靶原子留在原位,  $E_2$  以声子形式释放.

若  $E_1 < E_{disp}$  且  $E_2 < E_{disp}$ ,  $Z_1 \neq Z_2$ , 入射粒子  $Z_1$  变为间隙原子,  $E_1 + E_2$  以声子形式释放.

利用 SRIM 软件来仿真 GaN HEMT 结构. 本次计算采用  $10^6$  个粒子, 确保足够小的误差, 采用简单的结构 Au(200 nm)/Ni (20 nm)/AlGaIn (20 nm)/GaN(2  $\mu$ m). 由于在 GaN HEMT 器件中, 异质结界面的 2DEG 是影响器件的主要因素. 在仿真中我们主要考虑异质结界面附近的缺陷中心. 根据一定能量的质子在材料一定深度内产生的空位数, 我们可以计算出不同辐射剂量下在一定深度的空位密度. 如 3 MeV 质子辐照下, 在 20 nm 厚的 AlGaIn 中产生的 Ga 空位数为  $6.875 \times 10^{-6} \text{ n/\AA-ion}$ . 当质子剂量为  $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ , 辐射引入的 Ga 空位密度为  $6.875 \times 10^{-6} \times 10^8 \times 5 \times 10^{11} = 3.4375 \times 10^{14} \text{ n/cm}^3$ . 表 1 给出不同能量质子辐照下, 在 20 nm 厚的 AlGaIn 材料和 GaN 中靠近异质结界面 20 nm 范围内产生的空位数, 具体位置如图 1 所示.

表 1 不同能量质子辐照引入空位数

		单位: n/\AA-ion		
材料	空位种类	1.8 MeV	3 MeV	10 MeV
AlGaIn	Ga	$1.500 \times 10^{-5}$	$6.875 \times 10^{-6}$	$2.054 \times 10^{-6}$
	Al	$3.973 \times 10^{-6}$	$2.455 \times 10^{-6}$	$6.250 \times 10^{-7}$
	N	$1.067 \times 10^{-5}$	$5.089 \times 10^{-6}$	$1.027 \times 10^{-6}$
GaN	Ga	$9.375 \times 10^{-7}$	$4.018 \times 10^{-7}$	$8.929 \times 10^{-8}$
	N	$3.572 \times 10^{-7}$	$2.679 \times 10^{-7}$	$4.464 \times 10^{-8}$

图 6(a) 为 3 MeV, 图 6(b) 为 1.8 MeV 质子辐照在 20 nm 厚的 AlGaIn 中产生的空位密度. 图 7(a) 为 3 MeV, 图 7(b) 为 1.8 MeV 质子辐照在 GaN 中靠

近 AlGaIn/GaN 异质结一侧 20 nm 厚度内产生的空位密度. 从图中可以直观看出, 随着辐射剂量增加, 空位密度增大, 并且 Ga 空位多于 N 空位. Ga 空位的引入, 其作为受主, 在器件退化中起了至关重要的作用.

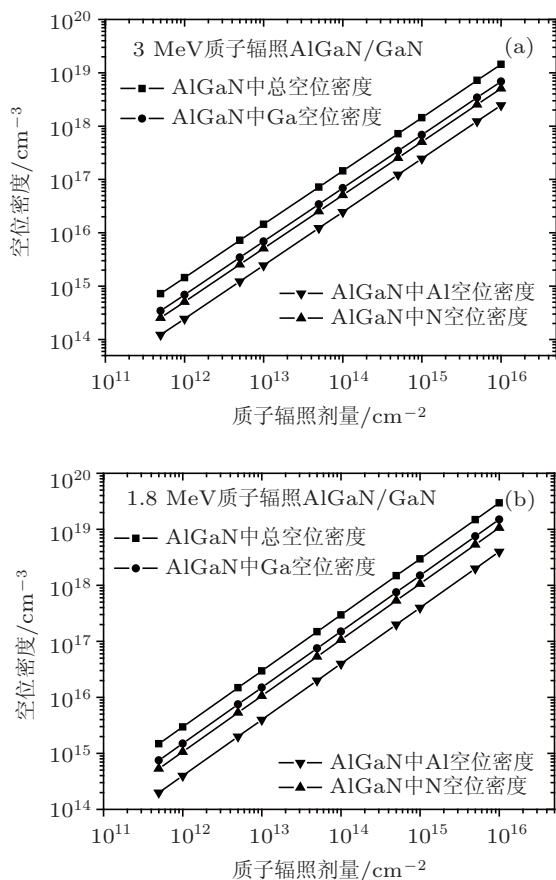


图6 20 nm 厚的 AlGaIn 层中辐照引入的空位密度 (a) 3 MeV; (b) 1.8 MeV

随着入射质子能量增加, 转移到晶格原子上的 NIEL 逐渐减小. 我们计算得到不同能量质子在 GaN 层中靠近异质结一侧 20 nm 范围内引入的空位缺陷密度, 如图 8. 可以看出, 随着质子能量的增加, 在靠近 AlGaIn/GaN 异质结界面的 GaN 中辐射引入的 Ga 空位密度减小. 这是因为, 质子为重粒子, 入射能量大时, 我们认为离子运动轨迹是一条直线. 能量越大, 离子的射程就越远, 辐射损伤区 (离子停留处) 离异质结界面就越远, 界面处相应产生的空位就越少.

被 Ga 原子吸收的能量主要是产生原子位移, 进而产生缺陷中心. 图 9 给出了不同能量的质子辐照下, 在 GaN 中被反冲原子 Ga 和 N 吸收的能量变化曲线. 从图中发现被反冲 Ga 原子吸收的能量要大于反冲 N 原子吸收的能量, 导致 Ga 空位密度明

显大于 N 空位密度. 并且随着质子能量的增加, 反冲原子吸收能量逐渐减小, 低能量质子可以转移更多的非电离能, 造成更大的位移损伤. 并且这就解释了为什么质子能量越低, 在异质结界面处辐射引入的缺陷就越多.

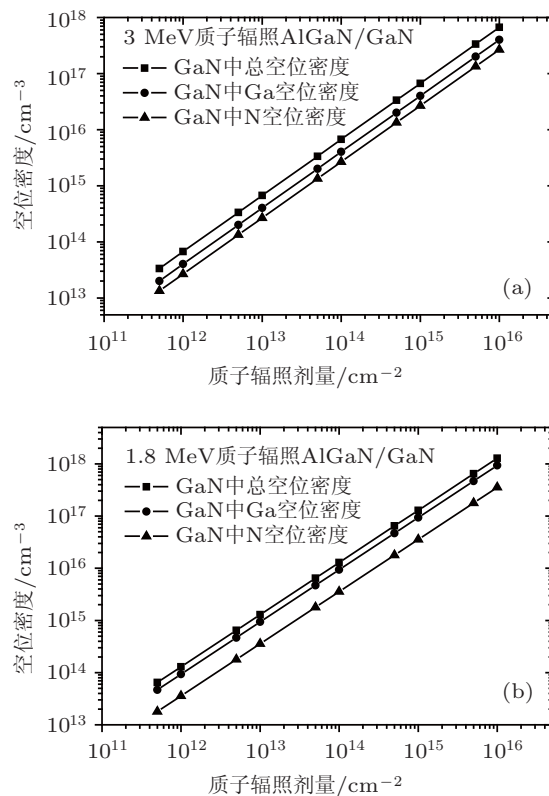


图7 GaN 层中靠近 AlGaIn/GaN 异质结界面一侧 20 nm 厚度内辐照引入的空位密度 (a) 3 MeV; (b) 1.8 MeV

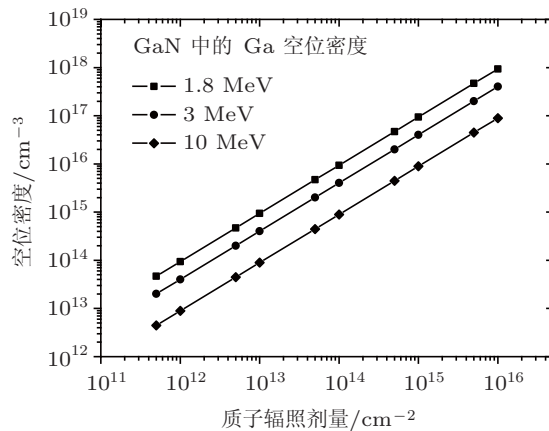


图8 不同能量质子在 GaN 层中靠近异质结一侧 20 nm 范围内引入的空位缺陷密度

根据实验结果发现, 1.8 MeV 质子辐照 AlGaIn/GaN HEMTs, 剂量达到  $1 \times 10^{15}$  protons/cm<sup>2</sup> 时, 漏极最大饱和电流下降 50%, 跨导下降了约 20%<sup>[4]</sup>.

3 MeV 质子辐照 AlGaIn/GaN HEMTs, 在相同的质子辐照剂量下, 漏极最大饱和电流下降 20%, 跨导下降了约 5%. 1.8 MeV 质子辐照要比 3 MeV 质子辐照退化严重得多. 我们认为: 在 GaN HEMT 器件中, 空位的产生是使得材料和器件参数特性发生一定退化的主要原因. 空位的多少直接关系到器件退化的程度, 1.8 MeV 质子辐照比 3 MeV 质子辐照在异质结界面附近引入更多的空位缺陷. 为了验证上述分析结果, 我们在相同条件下采用 10 MeV 能量质子辐照 AlGaIn/GaN HEMT 器件, 比较结果如图 10 所示, 此时剂量为  $1 \times 10^{12}$  protons/cm<sup>2</sup>. 可以发现, 10 MeV 质子辐照后器件特性几乎不变, 而 3 MeV 辐照器件退化稍微严重, 但是因为其辐照剂量比较低, 退化不是很明显.

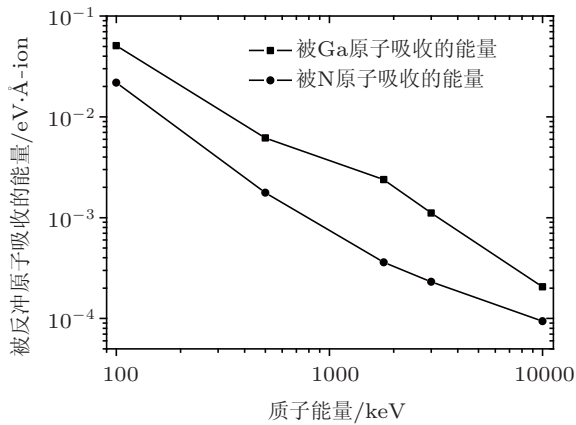


图9 靠近 AlGaIn/GaN 异质结界面的 GaN 层中被反冲原子 Ga 和 N 吸收的能量随质子能量的变化

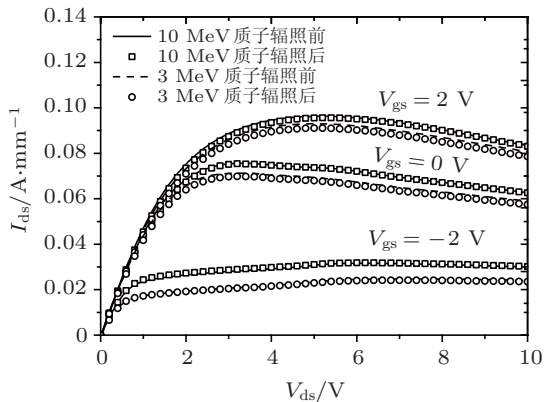


图10 3 MeV 和 10 MeV 质子辐照前后输出特性比较 (辐照剂量为  $1 \times 10^{12}$  protons/cm<sup>2</sup>)

采用变频  $C-V$  Hg 探针测试 AlGaIn/GaN 异质结材料质子辐照前后特性的变化, 频率分别为 100 kHz 和 1 MHz, 质子能量为 3 MeV, 剂量为  $1 \times 10^{15}$  protons/cm<sup>2</sup>, 如图 11 所示.

高频下, 因为陷阱电荷在高频信号下不起作用, 陷阱对电容没有影响,  $C = C_{sc}$ . 低频下, 考虑陷阱影响,  $C = C_{sc} + C_t$ . 其中,  $C$  为测试电容,  $C_{sc}$  为空间电荷引起的电容,  $C_t$  为陷阱引起的电容.

陷阱引起的电容可以表示为<sup>[11]</sup>

$$C_t = AqN_t \frac{\arctan(\omega\tau)}{\omega\tau}, \quad (3)$$

其中,  $A$  为面积,  $q$  为电荷,  $N_t$  为有效陷阱态密度,  $\omega$  为频率,  $\tau$  为时常数. 在低频 100 kHz 下, 从文献中提取常数约为  $10^{-6}$ s<sup>[11,12]</sup>. 质子辐照前后有效陷阱态密度如图 12 所示.

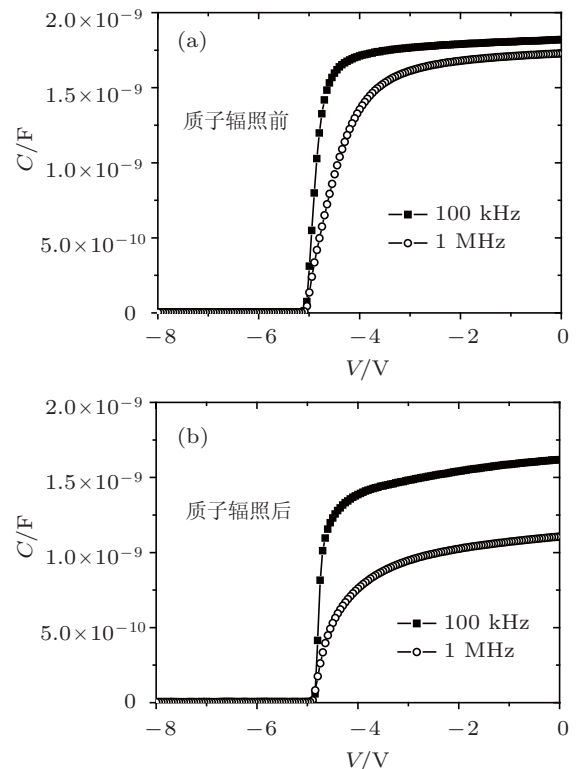


图11 AlGaIn/GaN 异质结材料质子辐照前后  $C-V$  特性变化 (a) 辐照前; (b) 辐照后

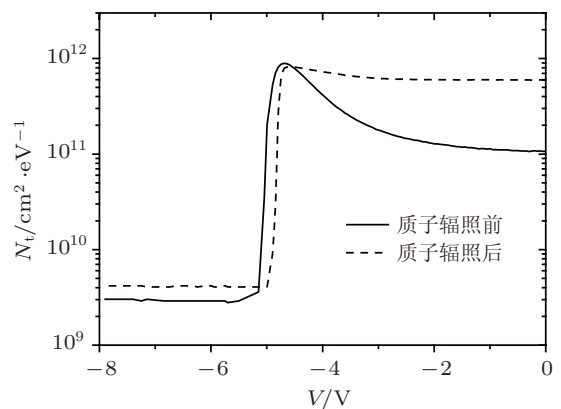


图12 质子辐照前后有效陷阱态密度变化

研究表明深耗尽区未开启状态下  $C_t$  主要是由 Ga 空位相关缺陷引起. 从图中可以看出, 在深耗尽区, 质子辐照后材料的有效陷阱态密度明显增大, 说明了 Ga 空位相关缺陷在辐照后明显增多.

## 4 结论

综上所述, GaN 材料具有很强的抗辐照能力. 3 MeV 质子辐照 AlGaIn/GaN HEMT 器件, 随着辐照剂量的增加, 饱和漏电流和最大跨导逐渐减小, 阈值电压向正向漂移, 栅泄露电流增加. 从 SRIM

软件仿真中可以看出, 随着入射质子能量增加, 转移到晶格原子上的 NIEL 逐渐减小. 空位的产生是材料和器件参数特性发生退化的主要原因. 在相同辐照剂量下, 由于 1.8 MeV 质子辐照在异质界面附近引入更多的空位缺陷, 1.8 MeV 质子辐照要比 3 MeV 质子辐照退化严重得多. 实验结果也证明 10 MeV 质子辐照与 3 MeV 质子辐照相比, 相同剂量下器件特性退化比较小. 从变频  $C-V$  测试结果得出, 质子辐照引起材料有效陷阱态密度增大, 说明辐照引入了 Ga 空位缺陷.

- 
- [1] Claeys C, Simoen E (Translated by Liu Z L) 2008 *Radiation Effects in Advanced Semiconductor Materials and Devices* (Beijing: National Defence Industry Press) p20 (in Chinese) [Claeys C, Simoen E 著, 刘忠立译 2008 先进半导体材料及器件的辐射效应 (北京: 国防工业出版社) 第 20 页]
- [2] Nedelcescu A L, Carlone C, Houdayer A, Bardeleben H J, Cantin J L, Raymond S 2002 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **49** 2733
- [3] Aktas O, Kuliev A, Kumar V, Schwindt R, Toshkov S, Costescu D, Stubbins J, Adesida I 2004 *Solid-State Electron.* **48** 471
- [4] Gu W P, Zhang J C, Wang C, Feng Q, Ma X H, Hao Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1161 (in Chinese) [谷文萍, 张进城, 王冲, 冯倩, 马晓华, 郝跃 2009 物理学报 **58** 1161]
- [5] Hu X W, Karmarkar A P, Jun B, Fleetwood D M, Schrimpf R D, Geil R D, Weller R A, White B D, Bataiev M, Brillson L J, Mishra U K 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 1791
- [6] Kim H Y, Kim J, Yun S P, Kim K R, Anderson T J, Ren F, Pearson S J 2008 *J. Electrochem. Soc.* **155** H513
- [7] Ziegler J F, Ziegler M D, Biersack J P 2010 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* **268** 1818
- [8] White B D, Bataiev M, Goss S H, Hu X, Karmarkar A, Fleetwood D M, Schrimpf R D, Schaff W J, Brillson L J 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 1934
- [9] Kalavagunta A, Touboul A, Shen L, Schrimpf R D, Reed R A, Fleetwood D M, Jain R K, Mishra U K 2008 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **55** 2106
- [10] Petrosky J C, McClory J W, Gray T E, Uhlman T A 2009 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **56** 2905
- [11] Xie S Y, Yin J Y, Zhang S, Liu B, Zhou W, Feng Z H 2009 *Solid-State Electron.* **53** 1183
- [12] Miller E J, Dang X Z, Wieder H H, Asbeck P M, Yu E T 2000 *J. Appl. Phys.* **87** 8070

# Effects of 3 MeV proton irradiations on AlGaN/GaN high electron mobility transistors

Lü Ling<sup>†</sup> Zhang Jin-Cheng Li Liang Ma Xiao-Hua  
Cao Yan-Rong Hao Yue

(School of Microelectronics, Key Laboratory of Wide Band-Gap Semiconductor Materials and Devices, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(Received 26 April 2011; revised manuscript received 7 July 2011)

## Abstract

AlGaN/GaN high electron mobility transistors (HEMT) are exposed to 3 MeV protons irradiation. The drain saturation current decreases 20% and the maximum transconductance decreases 5% at a fluence of  $1 \times 10^{15}$  protons/cm<sup>2</sup>. As fluence increases, the threshold voltage is shifted toward more positive values. After proton irradiation, the gate leakage current increases. The degradation caused by 1.8 MeV proton is significantly higher than by 3 MeV proton irradiation at the same fluence. The radiation damage area and the density of vacancies at a given depth are obtained from software SRIM. As the energy of the incident proton increases, the non-ionizing energy transferred to the crystal lattice decreases. It is concluded that vacancies introduced by proton irradiation may be the primary reason for the degradations of electrical characteristics of AlGaN/GaN HEMT.

**Keywords:** proton irradiation, AlGaN/GaN HEMT, SRIM, vacancies density

**PACS:** 72.80.Ey, 73.40.Kp, 14.20.Dh

---

<sup>†</sup> E-mail: ling.lv.xidian@hotmail.com