

质子注入对 GaAs 基器件隔离研究

宗梦雅¹, 代京京^{1*}, 李 尉¹, 温丛阳², 张 彤¹, 王智勇^{1,2*}

(1. 北京工业大学材料与制造学部, 北京 100124;

2. 陕西科技大学材料原子分子科学研究所, 陕西 西安 710021)

摘要: 质子注入参数对注入型垂直腔面发射激光器 (Vertical cavity surface emitting laser, VCSEL) 的电流限制孔径位置及电流限制效果具有较大影响。文中从质子注入的能量和剂量及其相互作用对 VCSEL 电流限制孔径的影响规律及机制出发, 通过理论模拟分析了注入参数对质子分布及注入区电阻值的影响。在此基础上, 采用 VCSEL 外延片进行了质子注入实验研究。实验结果和理论分析均表明: 注入区电流隔离效果及质子分布受注入能量和剂量共同调控。当注入参数为 320 keV、 $8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 时, 经 430 °C、30 s 退火后可得到结深约 0.7 μm , 平均射程距有源区约 1.3 μm , 电阻值达 $4.6 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 的质子注入区。使用该参数制备的 VCSEL 器件实现了较好的激光激射, 证明该质子分布不仅可避免 VCSEL 有源区损伤, 而且能实现较好的电流隔离效果, 满足 VCSEL 电流限制孔径的制备要求。研究结果对质子注入型 VCSEL 的芯片结构及工艺优化具有重要指导意义。

关键词: 质子注入; 垂直腔面发射激光器; GaAs 基质; 晶格缺陷

中图分类号: TN365 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220141

Study on proton implantation isolation of GaAs-based devices

Zong Mengya¹, Dai Jingjing^{1*}, Li Wei¹, Wen Congyang², Zhang Tong¹, Wang Zhiyong^{1,2*}

(1. Department of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Institute of Atomic and Molecular Science, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract: Proton injection parameters have a great influence on the position of current confinement aperture and the effect of current isolation of the implantation vertical cavity surface emitting laser (VCSEL). From the influence rule and mechanism of the energy and dose of proton implantation and their interaction on the current confinement aperture of VCSEL, this paper analyzes the influence of implantation parameters on the proton distribution and the resistance value of the implanted region by theoretical simulation firstly. And then proton implantation experimental research were carried out using VCSEL epitaxial wafers on this basis. Both the experimental results and theoretical analysis show that the current isolation effect and proton distribution in the injection region are controlled by injection energy and dose. When the implantation parameters are 320 keV and $8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$, after annealing at 430 °C for 30 s, a proton implantation region can be obtained with a junction depth of about 0.7 μm , an average range of about 1.3 μm from the active region and a resistance value of $4.6 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}^2$. The VCSEL device was fabricated by using this parameter, and better laser excitation was achieved. It is proved that the proton distribution can not only avoid the damage of VCSEL active region, but also achieve an excellent current isolation effect, meeting the fabrication requirements of the VCSEL current confinement aperture. The

收稿日期:2022-03-04; 修订日期:2022-04-20

作者简介:宗梦雅,女,硕士生,主要从事主半导体 VCSEL 芯片工艺等方面的研究。

导师(通讯作者)简介:王智勇,男,研究员,博士,主要从事大功率半导体激光关键器件制备与集成技术等方面的研究。

通讯作者:代京京,女,高级实验师,博士,主要从事大功率半导体激光关键器件制备与集成技术等方面的研究。

results of this study have important guiding significance for the chip structure and process optimization of proton-injected VCSELs.

Key words: proton implantation; VCSEL; GaAs matrix; lattice defect

0 引言

VCSEL 以其单纵模、易于二维集成^[1]、可在片测试^[2]、易于与光纤耦合^[3]等优点,在通信、光互连、材料加工、传感等诸多领域有着广泛的应用^[4-6]。多年来,通过提高外延片质量、优化器件结构和改善散热设计,VCSEL 的性能得到不断提高。然而要制备出高质量的 VCSEL 器件,其制备工艺相当重要。其中,电流限制孔径的制备是关键环节之一。

常见的 VCSEL 电流限制孔径制备方法有选择氧化法、空气柱法和质子注入法^[7]。选择氧化法是通过生成的 Al_xO_y 层形成内置折射率导引,同时实现电流限制和横向光场约束^[8]。但氧化过程中 AlGaAs 层产生的应变和缺陷会降低器件可靠性,且氧化工艺的可控性和均匀性较差^[9]。空气柱法是通过刻蚀的方法形成电流限制窗口,其工艺复杂,稳定性难以控制。与上述方法相比,质子注入法是利用 H^+ 离子在 GaAs 靶材中形成的高阻区实现横向注入电流限制。该方法不受台面间距限制,可控性强,制备的器件稳定性和成品率高,适用于工业应用^[10]。然而,VCSEL 性能受质子注入的能量和剂量影响。当注入能量较高时,质子会穿透有源区形成非辐射复合中心,导致 VCSEL 器件性能退化^[11];反之,注入能量较低时,质子分布距离有源区较远,使得注入电流横向扩展严重,电流限制作用较弱^[12]。当注入剂量较大时,靶材的晶格损伤严重,难以通过退火修复和激活杂质,导致注入区阻值较小;反之,注入剂量较小时会产生电流泄漏,无法起到理想的电流限制效果。因此,对于质子注入型 VCSEL 电流限制孔径的制备需要综合考虑质子注入能量和剂量的影响作用。目前,人们已对 GaAs 基器件的质子注入工艺做了较多研究。在前人的研究中,参考文献 [12] 深入研究了注入能量会改变有源区横向电流扩展大小,但未考虑注入剂量引起的质子扩散范围对电流限制孔径的影响;参考文献 [13] 分析了在不同退火温度下质子注入剂量对电流隔离效果的影响,但未研究注入能量对注入区阻值的作用。

文中从质子注入过程中产生的微观晶格缺陷类型探究了 GaAs 材料中高阻区的形成机制,通过理论

和仿真计算了注入能量和剂量对质子分布和注入区电阻值的综合影响。依据上述分析可知注入质子的能量和剂量共同决定了质子分布区位置以及高阻区隔离电流的效果。基于以上结论,进一步对 VCSEL 外延片进行了质子注入验证实验,得到了注入区分布情况和电阻值,实验结果证明了上述分析的正确性。同时,采用质子注入参数为 320 keV, $8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 的 VCSEL 实验样片制备成器件,实现了激光激射。以上研究结果对质子注入型 VCSEL 的设计与工艺提供了依据。

1 理论分析及仿真

1.1 质子注入分布规律

H^+ 离子束流在高速电场的作用下注入靶材中形成高阻区,该高阻区的质子浓度分布服从高斯分布函数^[13]:

$$N(x) = \frac{\Phi}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p} \exp\left[-\frac{(x-R_p)^2}{2\Delta R_p^2}\right] \quad (1)$$

式中: $N(x)$ 为注入深度 x 处的质子浓度; Φ 为质子注入剂量; x 为距离外延层表面的深度; R_p 为质子入射到靶材的平均射程; ΔR_p 为平均射程的标准偏差; $2\Delta R_p$ 对应注入区的结深。当注入深度 $x = R_p$ 时, N_{\max} 对应质子峰值浓度分布。 R_p 与注入能量 E 有关,其关系式表示如下^[13]:

$$R_p = \int_0^E \frac{dE'}{S \int d\delta T \cdot \cos\theta} \exp\left[\int_0^{E'} \int d\delta(1-\cos\theta)\right] \frac{dE''}{\int d\delta T \cdot \cos\theta} \quad (2)$$

式中: S 为靶材密度; θ 为散射角; T 为离子入射散射损耗的能量; $d\delta$ 为电子核与电子微分散射截面之和。公式 (1)、(2) 反映了质子浓度随注入能量和剂量的分布关系。

H^+ 离子以相同的注入剂量 ($6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$)、不同注入能量入射到 GaAs 材料中的平均射程与能量的关系曲线如图 1 所示。由图 1 可知,注入质子的平均射程 R_p 随注入能量的增加而增加,能量和平均射程比约为 $0.9 \mu\text{m}/100 \text{ keV}$ 。

上述注入条件下质子浓度随注入深度的函数关系曲线如图 2(a) 所示。由图 2(a) 可知,注入区质子峰值浓度随着注入能量的增大而下降。这是由于离子

注入区歧变现象,注入能量越大,离子的分布将会横向分散,进而使得注入区浓度降低。

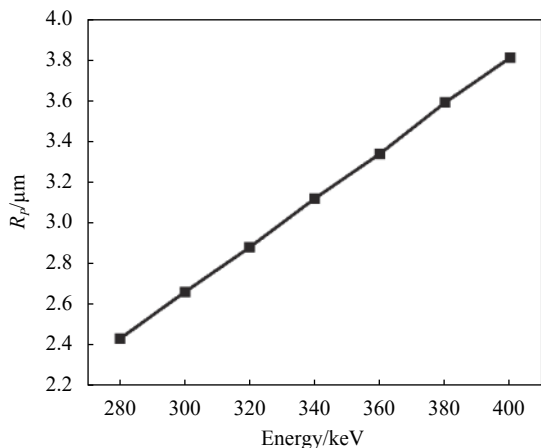


图 1 不同能量的 H⁺离子注入时质子平均射程分布曲线

Fig.1 Average range distribution curve of proton during H⁺ ion implantation with different energy

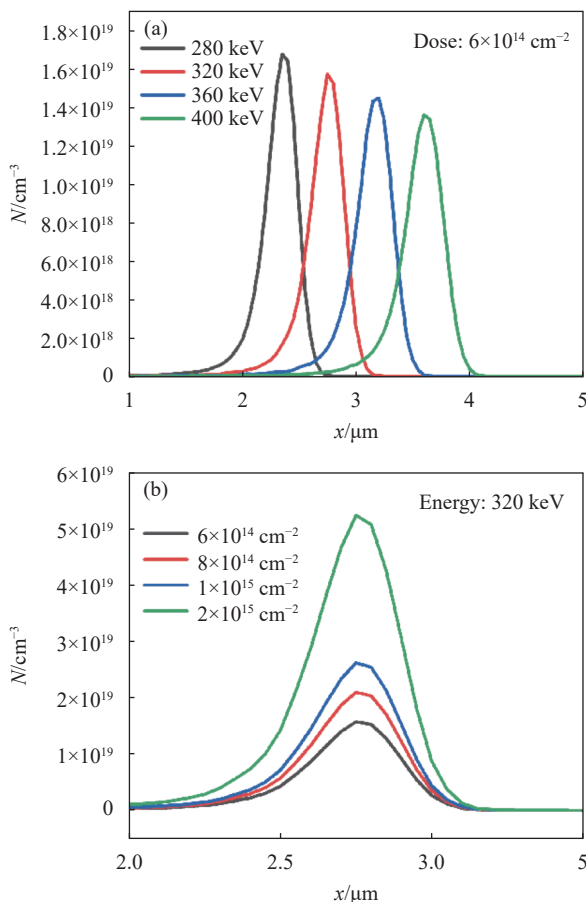


图 2 (a) 不同能量的 H⁺离子注入时质子浓度分布曲线; (b) 不同剂量的 H⁺离子注入时质子浓度分布曲线

Fig.2 (a) Proton concentration distribution curve during H⁺ ion implantation with different energy; (b) Proton concentration distribution curve depth during H⁺ ion implantation with different dose

当 H⁺离子以一定能量 (320 keV)、不同剂量注入 GaAs 材料中时,其浓度分布情况如图 2(b) 所示。从图 2(b) 可以看出,随着质子注入剂量的增加,质子峰值浓度显著增加。同时,质子分布结深也呈现递增趋势。由此可知,质子注入的能量和剂量会对靶材中的质子注入区的平均射程、结深、质子浓度产生综合影响,进而影响注入区的电学性能。

1.2 质子注入区电学特性

将质子以一定能量和剂量注入至 GaAs 材料中时,质子与靶材间发生的电子碰撞和原子核碰撞会破坏 GaAs 晶体结构的有序性,产生微观晶格缺陷,其中电荷型晶格缺陷会影响材料电学特性。其在 GaAs 材料的导带下形成深受主能级,价带上形成深施主能级,有效抑制了多数载流子的产生。降低的多子浓度随质子注入剂量的变化关系可由公式 (3) 表示^[14]:

$$n(\Phi) = n(0) - \frac{\Delta n}{\Delta \Phi} \Phi \quad (3)$$

式中: $n(0)$ 为注入前的多子浓度; $n(\Phi)$ 为注入质子后的多子浓度; $\frac{\Delta n}{\Delta \Phi}$ 为多子去除率。同时,质子注入区的电阻率受载流子浓度影响,由公式 (4) 表示^[14]:

$$\rho = \frac{1}{e(nu_n + pu_p)} \quad (4)$$

式中: e 为电子电荷量; n 和 p 分别表示电子和空穴浓度; u_n 和 u_p 分别表示电子和空穴的迁移率。同时,电荷型晶格缺陷作为载流子的散射中心会降低载流子的迁移率。由公式可见,多子浓度和载流子迁移率的降低导致电阻率 ρ 升高,电阻增大。由此,质子注入区成为高阻区,约束横向电流。

靶材的晶格损伤程度与注入质子剂量有关,用 SRIM 软件模拟了不同数量的离子轰击靶材时对靶材的损伤情况,如图 3 所示。随着靶材中注入离子数增多,碰撞质子在靶材中将能量依次转移给其他原子,形成的级联碰撞 (Cascade) 使质子扩散范围扩大,产生大量复杂缺陷并聚集为较大的缺陷团^[15],如图 3(a)、(b) 所示的缺陷状态转变。

通常,使用快速退火工艺可以修复损伤并激活部分对载流子运输无贡献的缺陷。但当注入质子剂量过大时,损伤区会沉积为无序区,此时难以通过退火修复晶格损伤,使得载流子迁移率降低,电阻率下降^[16]。

综上所述,质子注入的能量主要影响质子注入区深度,但随着能量的提高,质子浓度呈降低趋势;质子

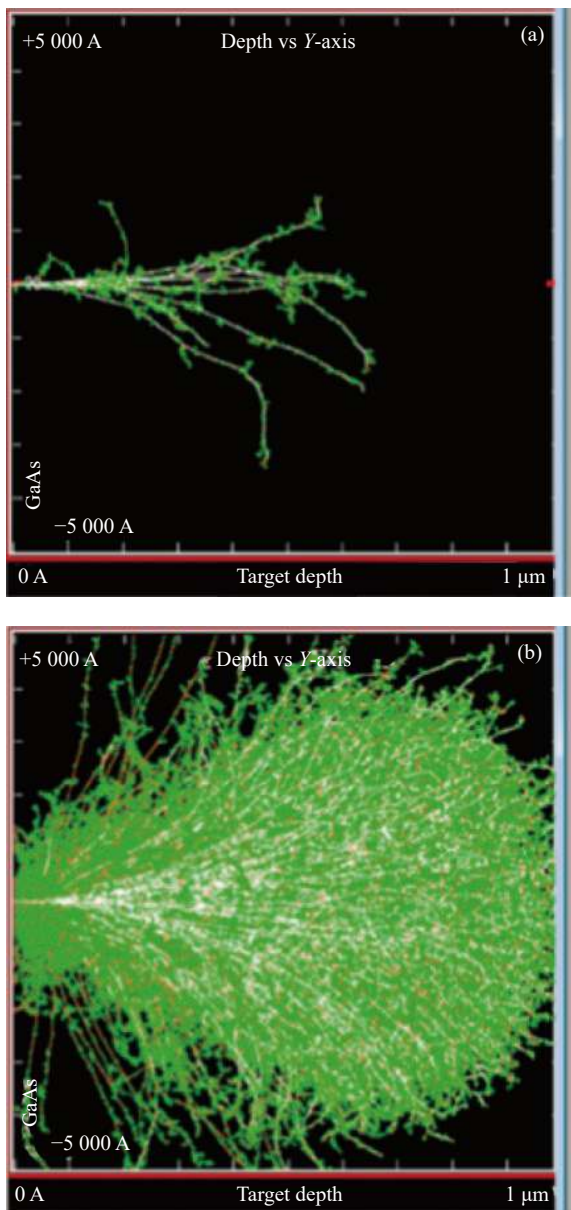


图 3 离子碰撞产生的晶格 (a) 局部缺陷和 (b) 大量缺陷团

Fig.3 Lattice (a) local defects and (b) a large number of defect clusters produced by ion collision

注入剂量影响质子区分布结深和质子浓度,当剂量过大时,会对晶格缺陷产生较大影响,注入区出现多种复合缺陷类型,呈现非晶化状态,晶格难以通过退火修复,电学阻隔效果变差。在实际制备 VCSEL 电流限制孔径的过程中,既要保证注入区形成良好的电流阻隔,同时也要避免有源区出现点缺陷产生非辐射复合。因此,要充分考虑注入剂量和能量的相互作用和对晶格的影响机制,精确调控两参数,使得质子注入区在有源区附近形成高阻区限制电流,且其分布不能扩散进入有源区影响发光。

2 质子注入实验验证

基于上述理论分析,进一步通过实验验证研究质子注入区的分布及阻值。实验使用同组实验人员自主设计生长的 VCSEL 外延片,其中 P-DBR 层由多对渐变组分的 $Al_xGa_{1-x}As$ ($x=0.12\sim 0.90$) 组成,有源区距外延片表面约 $3\ \mu m$ 。VCSEL 外延结构示意图和 SEM 扫描图像如图 4 所示。

为保护晶圆表面不受质子轰击损伤,在外延片表面沉积 $500\ nm\ SiO_2$ 作为掩膜层,且出光窗口区域不能制备高阻区,因此需要叠加阻挡层防止质子进入,如图 5 所示。为了保证阻隔质子的效果,采用 $7\ \mu m$ 光刻胶作为阻挡层,通过 SRIM 模拟可知该厚度可以

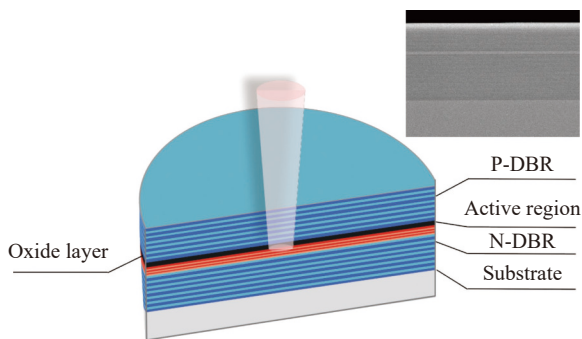


图 4 VCSEL 外延结构

Fig.4 Epitaxial structure of VCSEL

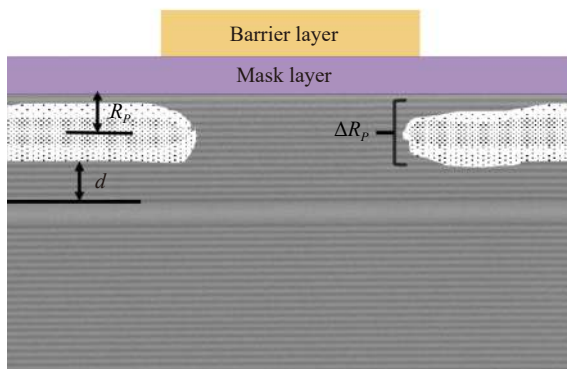
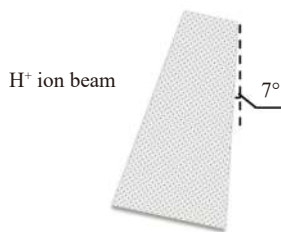


图 5 质子注入工艺图

Fig.5 Proton implantation process diagram

有效阻挡 400 keV 以下能量的质子进入靶材, 如图 6 所示。

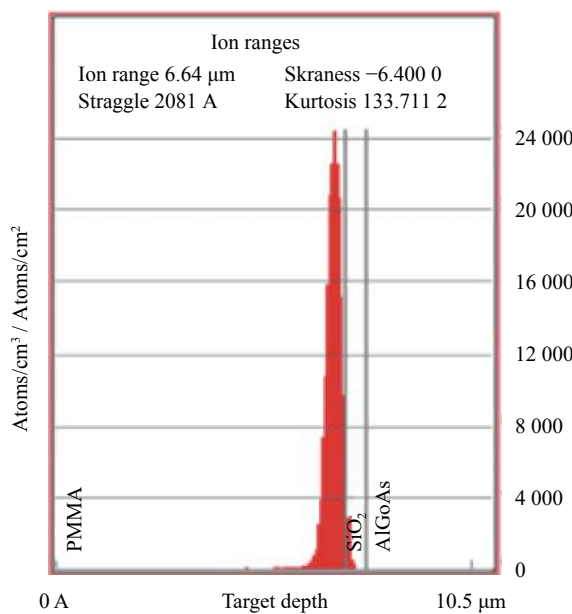
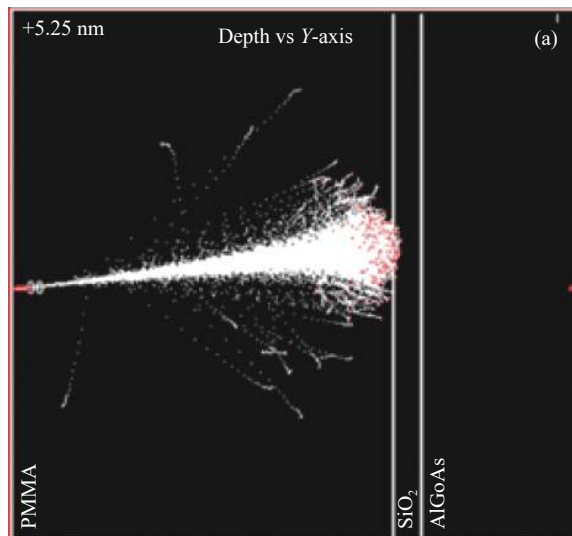


图 6 400 keV H⁺ 离子的 (a) 轰击过程和 (b) 射程分布

Fig.6 (a) The ombardment process and (b) the range distribution of 400 keV H⁺ ions

质子注入实验前先将 VCSEL 外延片进行丙酮、乙醇和去离子水清洗, 再使用等离子体增强型化学气相沉积 (PECVD) 的方法制备 500 nm SiO₂ 作为掩膜层, 在出光窗口区制备一层 7 μm 的 AZ4620 光刻胶作为阻挡层。通过光刻显影后得到图形窗口, 将实验样品放进 LC-4 型高能离子注入机中进行质子注入。为避免沟道效应, 束流与靶材法线方向之间的角度设为 7°。离子总束流强度为 20 μA/cm², 扫描范围为 2×

2 cm²。各组实验的注入参数分别为: 280 keV, 6×10¹⁴ cm⁻²; 320 keV, 6×10¹⁴ cm⁻²; 320 keV, 8×10¹⁴ cm⁻²; 320 keV, 1×10¹⁵ cm⁻²; 320 keV, 2×10¹⁵ cm⁻²; 360 keV, 6×10¹⁴ cm⁻²; 400 keV, 2×10¹⁵ cm⁻²。注入完成后, 样品经过 430 °C、30 s 快速热退火处理, 修复损伤并激活杂质。再对样品进行反应离子刻蚀 (RIE) 去除表面 SiO₂, 然后制备欧姆接触电极。其中, P 电极金属材料为 Ti/Al/Ti/Au, N 电极金属材料为 Ni/Au/Ge/Ni/Au。

3 质子注入实验结果分析

3.1 质子注入区分布 SEM 表征

在加速电压 5 kV、探针电流 12 pA 的扫描条件下, 采用 SEM 观测质子注入区形貌, 在样品外延片的断面可以清晰地观察到质子注入区域。将注入样品编号为 1~7 组样品。上述注入能量和注入剂量下质子注入平均射程 R_p 、结深 $2\Delta R_p$ 以及注入区下沿距有源区距离 d 的实验结果如表 1 所示。其中, 质子注入平均射程影响质子区深度, 质子注入区结深影响质子区浓度, 注入区下沿距有源区的距离影响 VCSEL 发光。

表 1 SEM 表征结果

Tab.1 Characterization results of SEM

Group	Energy/keV	Dose/cm ²	Average range, $R_p/\mu\text{m}$	Junction depth, $2\Delta R_p/\mu\text{m}$	Distance from active region, $d/\mu\text{m}$
1	280	6×10 ¹⁴	1.55	0.35	1.28
2	320	6×10 ¹⁴	1.67	0.61	1.03
3	320	8×10 ¹⁴	1.67	0.73	0.97
4	320	1×10 ¹⁵	1.68	0.84	0.9
5	320	2×10 ¹⁵	1.70	1.07	0.77
6	360	6×10 ¹⁴	1.72	0.71	0.93
7	400	2×10 ¹⁵	2.23	1.3	0

由表 1 可知, 当注入剂量为 6×10¹⁴ cm⁻² 时, 随着注入能量的提高 (280~360 keV), 质子注入的平均射程 R_p 显示递增趋势, 同时质子分布结深渐大。当注入能量为 320 keV 时, 随着注入剂量的增加, 质子分布结深随着增大, 与文中理论部分分析的质子分布随注入能量和剂量变化的分布规律基本一致。

第 1 组和第 7 组注入条件下的 VCSEL 外延片 SEM 扫描图如图 7(a)、(b) 所示。如图 7(a) 所示, 当用 280 keV, 6×10¹⁴ cm⁻² 的注入参数轰击 VCSEL 外延

片时,质子注入区结深为 0.35 μm ,距有源区距离 1.28 μm ,此注入参数下质子停留位置距离有源区较远。如图 7(b) 所示,当注入能量为 400 keV、注入剂量为 $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 时,质子区结深为 1.3 μm 。通过观测,注入区已经渗透到有源区,这会对器件性能造成损伤,影响出光。因此,较大的注入能量和剂量参数并不适用于 VCSEL 电流限制孔径的制备。

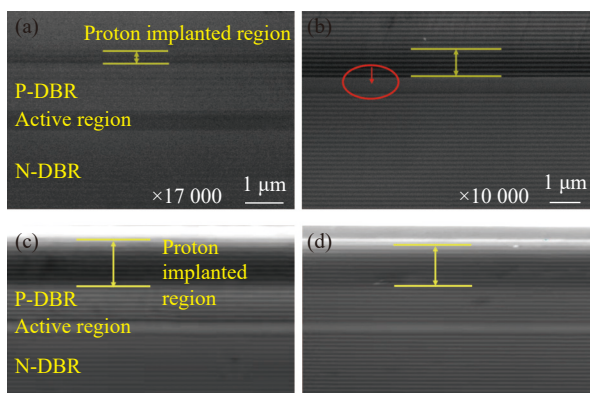


图 7 注入条件为 (a) 280 keV, $6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$; (b) 400 keV, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$; (c) 320 keV, $8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 和 (d) 360 keV, $6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 时的 SEM 扫描图像

Fig.7 SEM images under the injection conditions of (a) 280 keV, $6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$; (b) 400 keV, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$; (c) 320 keV, $8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ and (d) 360 keV, $6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$

当注入参数为 320 keV, $8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 和 360 keV, $6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 时,对应 SEM 扫描图像如图 7(c)、(d) 所示,注入区形成的结深均约 0.7 μm ,与有源区距离均约 0.9 μm 。从这两组的观测结果可直观地反映注入能量和剂量对注入效果的综合影响。第 3 组样品表现了以较小的能量虽轰击质子的深度较浅,但以较大的剂量注入时,依然能形成与第 6 组样品相似的注入结果。对于 VCSEL 的制备,这两者的质子分布区均满足条件,但仍需考虑质子注入区阻值。

其他以 320 keV 的能量注入的 3 组样品,其中 $6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 的注入剂量所形成的质子结深较浅,无法很好地约束横向注入电流的路径,而 10^{15} cm^{-2} 量级的注入剂量形成的质子区分布与有源区靠近,影响器件性能。

3.2 质子注入样品电阻值分析

观测完成后使用探针台对样品进行 $I-V$ 测试,并求得电阻。样品的电阻值随注入剂量的变化曲线如图 8 所示。由图 8 可以看出,注入剂量在 $6 \times 10^{14} \sim 8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 时,由于注入后引入深能级状态,复合了 GaAs

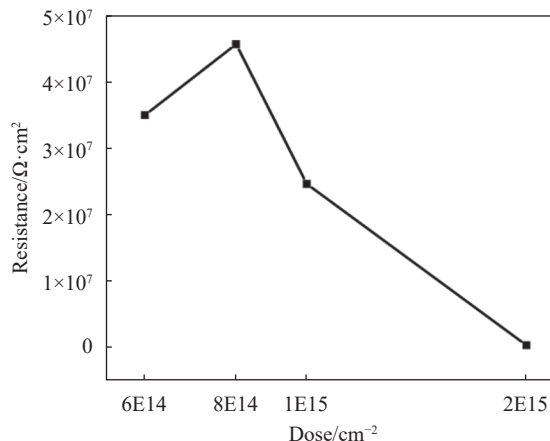


图 8 电阻值随注入剂量的变化曲线

Fig.8 Variation curve of resistance value with injection dose

多数载流子^[13],样品电阻值达到 $10^7 \sim 10^8 \Omega \cdot \text{cm}^2$,可以实现优异的电流隔离效果。然而,随着注入剂量继续增大,靶材产生的空穴与间隙原子增多,损伤区不断扩大,注入层的缺陷团相互交叠构成非晶层,出现无序的状态。通过退火难以激活杂质并修复大部分晶格损伤,因此电阻值呈下降趋势^[17]。

根据 SEM 观测和 $I-V$ 测试结果,通过分析质子注入量的相互作用和影响机制,在综合考虑质子分布位置和电流隔离效果的情况下,其中第 3 组样品的电阻值为 $4.6 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}^2$,第 6 组样品的电阻值为 $3.5 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}^2$,因此,第 3 组样品适宜制备 VCSEL 器件。使用该工艺参数制备了 VCSEL 器件,得到的 $P-I-V$ 曲线和近场分布如图 9 所示,该器件能实现较好的激光出射。

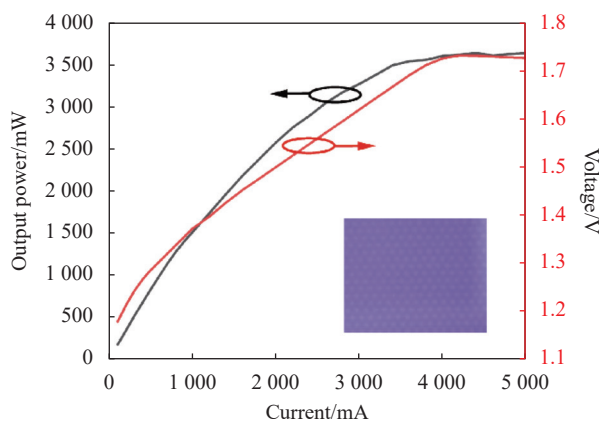


图 9 注入参数为 320 keV, $8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 时 VCSEL 的 P-I-V 曲线和近场分布

Fig.9 P-I-V curve and the near field distribution of VCSEL at injection parameters: 320 keV, $8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$

4 结 论

文中通过理论和仿真研究了质子注入量对质子分布的影响规律,探究了注入质子造成的微观晶格缺陷对高阻区的影响机制,得到了质子注入能量和剂量对质子注入区的分布和电流隔离效果有着关联影响。根据上述研究,进一步采用实验方法研究了 VCSEL 外延片质子注入参数对质子分布区位置及电阻值的影响,并得到与理论分析相一致的实验结果,即随着注入能量的增加,质子区平均射程加大的同时质子浓度下降,需要通过增加注入剂量提高质子浓度以获得较好的电流限制效果。对于文中的 VCSEL 外延片,当掩膜层为 500 nm SiO₂,注入能量和剂量分别为 320 keV 和 $8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 时,经在 430 °C、30 s 退火处理后,形成的质子注入区结深约 0.7 μm,高阻区阻值为 $4.6 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}^2$,注入平均射程距有源区约 1.3 μm,采用该参数制备的 VCSEL 器件可以兼顾质子注入电阻值和有源区非辐射复合损伤,形成激光激射。文中的结果对质子注入型 GaAs 基 VCSEL 器件的研制具有指导意义。

参考文献:

- [1] Han T, Zhang Y, Miao C X, et al. Anti-interference temperature control for VCSEL laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(9): 20190461. (in Chinese)
- [2] Elafandy R T, Kang J H, Mi C, et al. Study and application of birefringent nanoporous GaN in the polarization control of blue vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *ACS Photonics*, 2021, 8(4): 1041-1047.
- [3] Wang H, Du G, Cui H, et al. Room temperature continuous wave low threshold current ion implanted vertical cavity surface emitting laser using tungsten wires as mask [J]. *Optics & Laser Technology*, 2003, 35(5): 341-344.
- [4] Tong H X, Tong C Z, Wang Z Y, et al. Advances in the technology of 850 nm high-speed vertical cavity surface emitting lasers (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(12): 20201077. (in Chinese)
- [5] Zhang Y Q, Zuo Z Y, Kan Q, et al. Common failure modes and mechanisms in oxide vertical cavity surface emitting lasers [J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(2): 187-209. (in Chinese)
- [6] Pei L N, Zou Y G, Shi L L, et al. Design of low stress MEMS cantilever structure with tunable VCSEL [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(4): 0420002. (in Chinese)
- [7] Liu C, Cao C F, Lao Y F, et al. Electrically confined aperture formed by ion implantation and its effect on device optoelectronic characteristic [J]. *Journal of Semiconductors*, 2008, 29(4): 765-769. (in Chinese)
- [8] Chen L, Luo Y, Feng Y, et al. Temperature dependence of wet oxidation process based on VCSEL [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(7): 0701023. (in Chinese)
- [9] Naito H, Miyamoto M, Aoki Y, et al. Short-pulse operation of a high-power-density proton-implanted vertical-cavity surface-emitting laser array [J]. *Applied Physics Express*, 2012, 5(8): 082104.
- [10] Wang H S, Du G T, Cui H F, et al. Room temperature CW 850 nm vertical cavity surface emitting lasers fabricated by tilt ion implanting using Tungsten wires as mask [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004(2): 129-132. (in Chinese)
- [11] Pan G Z. Study of large-scale in-phased vertical cavity surface emitting laser array and integrated phase-controlled beam steering chip[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [12] Mao M M, Xu C, Wei S M, et al. The effects of proton implant energy on threshold and output power of vertical cavity surface emitting laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(21): 214207. (in Chinese)
- [13] Chen Z Q, Sun X W, Xia G Q, et al. Proton implant isolation of AlGaInP/GaAs heterojunction bipolar transistor structures in fabrication [J]. *Acta Physica Sinica*, 2000, 49(2): 375-378. (in Chinese)
- [14] Wang S W. Investigation of the radiation damage of a new PIN semi-conduct detector[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2006. (in Chinese)
- [15] Ge Z Y. The study on GaAs photoconductor detector by proton irradiation[D]. Chengdu: Sichuan University, 2004. (in Chinese)
- [16] Mao M M. Study of antiguided vertical cavity surface emitting laser and its two dimensional coherently coupled array[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [17] Que Z A, Hao X Y, He G K, et al. Simulation of ion implantation process for coaxial HpGe detector [J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2020, 40(2): 239-243. (in Chinese)