

## 2 MeV He<sup>+</sup>离子注入修复太赫兹发射源

杨 康 马明旺 陈西良 朱智勇

(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

**摘要** 为修复因加载过高外置偏压而被击穿的太赫兹光电导天线的发射晶体,采用离子注入法对光电导间隙区域进行了2 MeV He<sup>+</sup>离子注入处理。经过10<sup>16</sup> ions/cm<sup>2</sup> He<sup>+</sup>离子处理后,光电导天线的电阻由约800 Ω变为60 MΩ,基本恢复到了击穿前的水平。通过对比辐照前后太赫兹发射源在空气气氛中的时域谱和频域谱,发现离子辐照后太赫兹信号强度有了十分明显的增强,时域光谱峰值信号电流由辐照前的2 nA增加到了辐照后的8 nA,峰值功率增幅超过了一个量级,且发现处理后光电导天线的频谱相对于辐照前有了明显的展宽。

**关键词** 离子辐照,太赫兹光谱,光电导天线

**中图分类号** O77, O433

离子注入技术是有效的表面处理技术。离子与靶材料原子的相互作用,可显著改变靶材料物质的微观结构,从而改变材料的宏观性能。离子能量和注量精确可控,因此可实现对材料性能定量的调控。

由于近代高技术的发展和需要,促使离子注入技术的研究迅速向MeV能区扩展。高能离子在金属材料改性方面有重要用途而日益受到人们的重视,现已广泛应用于超高频高速器件、大功率器件、微波器件、光波导光存储器、表面物理、金属材料改性、超导材料改性、半导体材料改性、微细加工等技术领域。用MeV能量的离子注入半导体材料,可形成μm数量级的深注入区或各种掩埋层和绝缘层。采用不同能量的叠加注入,可造就各种类型的杂质与载流子分布。这些手段有可能开发许多新型结构的器件和电路<sup>[1-6]</sup>。

高能离子束轰击引起的材料改性、损伤与缺陷的产生机制研究还在进行,有待深入探讨与认识。从本质上来看,高能注入过程包含有丰富而复杂的物理内容。荷能离子在极短时间内把大量的能量转移给其运行路径周围靶原子的电子和原子核,瞬间能量的大量沉积引发材料发生一系列复杂的变化,如产生点缺陷、自由基和其他活性基团,甚至导致离子径迹上晶体材料的完全非晶化转变。如今,涉及到高能离子与固体相互作用的特性、晶体损伤微结构、二次缺陷的形成与抑制等这些研究领域仍然是国内外研究工作者所共同关心的问题。开展这些基础性研究,将为离子注入技术开辟新的、更广泛

的应用前景<sup>[7,8]</sup>。

太赫兹(THz)光电导天线(PCA),是利用短脉冲激光激励半导体材料发射太赫兹光波的装置,结构如图1。其基本原理是,在光电导半导体材料表面淀积金属制成偶极天线电极,用光子能量大于半导体禁带宽度的超短脉冲激光使半导体材料产生电子-空穴对,被激发的自由载流子在偏置电压的作用下辐射出具有皮秒脉宽的太赫兹电磁辐射脉冲,并通过天线向空间传播。此法是产生和探测THz波的常用方法<sup>[9-11]</sup>。低温生长的砷化镓(LTG-GaAs)具有良好的太赫兹发射性能,使用广泛<sup>[12-14]</sup>。

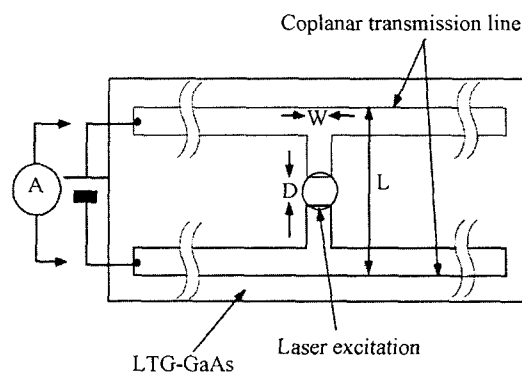


图1 光电导天线的结构示意图  
Fig.1 Structure of the photoconductive antenna

在外加电场作用下,载流子的加速运动会产生强瞬态电流,外加电场过高,则会导致发射晶体局部电击穿,从而丧失太赫兹波发射能力。鉴于发射晶体击穿区域狭小,且晶体与电极和电路板集成在

国家自然科学基金项目(10675157)资助

第一作者:杨康,男,1981年出生,2006年毕业于哈尔滨工程大学,现为中科院上海应用物理研究所研究生

通讯作者:朱智勇

收稿日期:2008-08-15,修回日期:2008-10-15

一起,如何修复电击穿的太赫兹发射天线,是亟须研究的一个问题。本工作尝试利用离子辐照技术对因加载过高电压而导致击穿的太赫兹光导天线进行修复。这种发射天线的太赫兹辐射能量主要来源于以偏置静电场形式储存的表面能,故偏置电压极大地影响其太赫兹发射性能。恢复光电导半导体的电阻,使其表面可加载上较高的偏置电压,是修复实验的关键所在。

## 1 实验

采用中国科学院上海应用物理研究所的 4UH 静电加速器的 2 MeV  $\text{He}^+$  离子束,束斑直径 1 mm,束流强度 13 nA,辐照时间为 1000 s。实验对象是一块被击穿的光电导体,系 400  $\mu\text{m}$  厚的 GaAs 基体上生长 1~2  $\mu\text{m}$  的 LTG-GaAs 薄膜。偏置电压通过电路板插脚加在光电导天线上,光电导天线的间隙  $D=1000 \mu\text{m}$ 。光电导天线前挡有一块开有  $\phi 2 \text{ mm}$  孔的铝箔,用于监测束流轰击的位置并保护电路板不受辐照。束流强度很低,可认为辐照时样品的温度为室温。

通过辐照位置的调整,对光电导间隙区域进行  $\text{He}^+$  离子辐照,注量为  $10^{16} \text{ ions/cm}^2$ 。由 TRIM 程序计算,2 MeV  $\text{He}^+$  离子在 GaAs 中的射程约为 5.88  $\mu\text{m}$ ,远大于 LTG-GaAs 的厚度。辐照处理前后测量光电导天线的电阻,用太赫兹时域光谱装置 (THz-TDS) 对天线的太赫兹发射性能进行观测。测量采用波长为 800 nm 脉宽为 80 fs 的激光器作为激励光源。

## 2 实验结果和讨论

辐照前,光电导天线的电阻约为 800  $\Omega$ ;辐照后为 60 M $\Omega$ ,基本恢复到了击穿前的水平。

用太赫兹时域光谱装置在空气气氛下测量离子注入前后的光电导天线的太赫兹发射性能。图 2 是光电导天线辐射波的时域谱,它相应于半导体表面瞬态光电流的时间微分,对应于单个太赫兹波的电场强度变化。前面的正值主峰来源于光生载流子在光电导天线外加偏置电压的加速下产生的急剧增大的浪涌电流<sup>[15]</sup>,随后的负值主峰来源于因载流子捕获所产生的电流衰减。图 2 表明,辐照晶体的太赫兹波信号强度明显增强。辐照后晶体的信号电流为 8 nA,比辐照前增大四倍。这是因为在辐照前的晶体已被击穿,表面形成电流通路,难以在天线电极间隙形成所需的偏置电压。离子辐照破坏了晶体表面存在的电流通道,并在晶体中形成大量彼此孤立

的载流子捕获陷阱,为载流子的加速运动和快速捕获创造了条件。

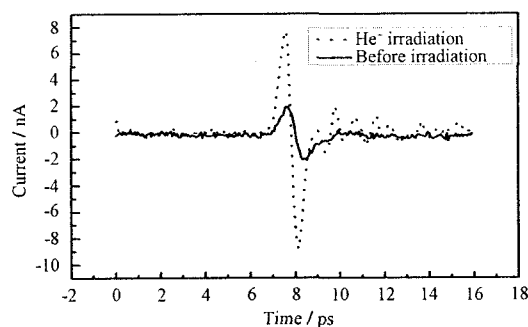


图 2 击穿的光电导天线在辐照前后的太赫兹时域谱  
Fig.2 THz Time-domain spectra of the breakdown PCA before (solid line) and after  $\text{He}^+$  irradiation (dot line)

图 3 是通过傅立叶变换获得的太赫兹频域谱,与辐照前相比,辐照后光电导天线的太赫兹波发射功率显著增强,峰值功率增幅超过一个量级。另外,辐照晶体内形成的大量捕获陷阱而增大了瞬态光电流的衰减速度,使光电导天线的频谱宽度比辐照前有一定程度的展宽。这是因为离子辐照使晶体中产生大量有效陷阱或载流子复合中心,有利于降低载流子寿命<sup>[16]</sup>,促使光电流快速衰减。

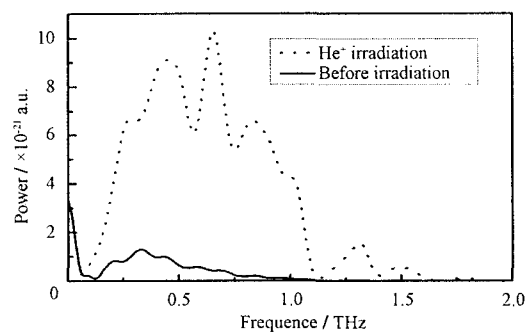


图 3 击穿的光电导天线在辐照前后的太赫兹频域谱  
Fig.3 THz frequency-domain spectra of the breakdown PCA before (solid line) and after  $\text{He}^+$  irradiation (dot line)

图 4 是在激光器功率 3.95 W、泵浦功率 0.58 W 时,光电导天线的频域谱随着外加偏置电压的变化,可见太赫兹发射功率随偏置电压增大。根据赫兹偶极近似,光电导天线辐射出的太赫兹脉冲的电场强度  $E$  与泵浦光功率  $P_{\text{in}}$ 、泵浦激光脉冲的时间间隔  $T_{\text{int}}$  和外加偏置电压  $V_b$  成正比,各种参数之间的关系由公式(1)来描述<sup>[17]</sup>。

$$E \propto \epsilon \mu T_{\text{int}} \frac{(1-R) P_{\text{in}} V_b}{h\nu D D} \quad (1)$$

式中,  $\mu$ 、 $h\nu$ 、 $R$ 、 $D$  分别是载流子迁移率、激发光子能量、光电晶体的反射系数和 PC gap 的宽度。

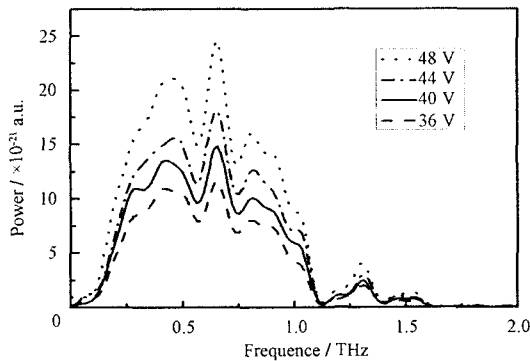


图 4 加载不同偏置电压时 PCA 的太赫兹频域谱  
Fig.4 THz frequency-domain spectra of the breakdown PCA under different DC bias

由于太赫兹发射功率与太赫兹脉冲电场强度  $E$  的平方成正比, 在其它条件都不变的情况下, 测得的太赫兹辐射功率  $P$  应与偏置电压  $V_b$  的平方成正比。但实验结果表明, 太赫兹辐射功率  $P$  与  $|V_b|^2$  之间的关系为  $P \propto (V_b^2)^{2.7}$ 。这可能是由于离子辐照在发射晶体中产生了多种具有不同势阱深度的缺陷结构, 这些缺陷中捕获的载流子会随着外加偏置电压的增加逐渐被释放出来, 从而形成更大的瞬态光电流, 辐射出的太赫兹信号也随之显著增强。

光电导天线可加载的最大电压已经大于 48 V, 这个数值十分接近同类完好天线的击穿电压(52 V)。图 4 还表明, 偏置电压的变化对太赫兹辐射的频谱宽度并无影响, 只起到了增大辐射功率的作用。图中向下的几个吸收峰如 0.57、0.74 和 1.12 THz 吸收峰来源于空气中水汽对太赫兹波的吸收<sup>[18]</sup>。

图 5 显示的是在外加偏置电压设定为 48 V 不变, 改变激光器输出功率的情况下光电导天线发射功率随激光功率的变化。由图 5 可见, 太赫兹发射功率随激光功率的增强线性增大。这是由于随着激发光子数量的增多, 更多的载流子受到激发而形成大的瞬态光电流。

### 3 总结和结论

用离子注入的方法可实现对被击穿光电导天线的修复。作为固体电介质, 光电导半导体被击穿的原因是在外电场不变情况下介质中的电流迅速增大, 在晶体表面附近形成由一个主通道和多个分支

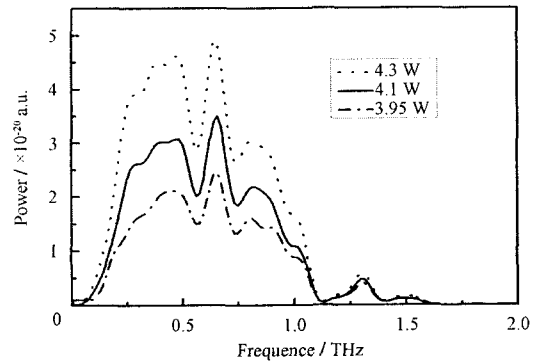


图 5 不同激光功率下光电导天线太赫兹发射功率的变化  
Fig.5 Fourier transformed amplitude spectra of the breakdown PCA under different laser powers

通道构成的导电通道, 通道中的固体已部分气化形成永久的结构损伤。这种通道取向与电介质微观结构、杂质、缺陷、外加电极形状等有关。用离子注入的方法能修复被击穿的光电导天线, 其机理在于注入离子与晶体中原子的相互作用过程破坏了导电通道区域材料的微观结构, 使光电导半导体恢复或部分恢复了原有的导电性质。同时, 辐照产生的多种缺陷结构对光导天线的太赫兹发射光谱也产生了明显的改善。

### 参考文献

- 1 卢武星, 吴瑜光. 原子核物理评论, 1997, 14(3): 181-184  
LU Wuxing, WU Yuguang. Nucl Phys Rev, 1997, 14(3): 181-184
- 2 浅利正敏, 开本亮. 微细加工技术, 1990, (4): 61-67  
Asari Masatoshi, Akira Folio. Micr Tech, 1990, (4): 61-67
- 3 林森浩, 王玟珉. 物理, 1990, 19(6): 345-348, 336  
LIN Senhao, WANG Wenmin. Physics, 1990, 19(6): 345-348, 336
- 4 黑井隆. 微细加工技术, 1992, (4): 9-14  
Takashi Kuroi. Micr Tech, 1992, (4): 9-14
- 5 邓里茂. 微细加工技术, 1989, (1): 24-26, 29  
DENG Limao. Micr Tech, 1989, (1): 24-26, 29
- 6 宋书林, 陈若夫, 尹志刚. 功能材料, 35(增刊): 1308-1310  
SONG Shulin, CHEN Ruofu, YI Zhigang. J of Func Mate, 35(Suppl): 1308-1310
- 7 金运范, 王志光. 原子核物理评论, 1998, 15(2): 88-96  
JIN Yunfan, WANG Zhiguang. Nucl Phys Rev, 1998, 15(2): 88-96

- 8 肖中银, 王廷云, 罗文芸. 物理学报, 2008, **57**(4): 2273–2275  
XIAO Zhongyin, WANG Tingyun, LUO Wenyun. Chin Phys, 2008, **57**(4): 2273–2275
- 9 Shen Y C, Upadhy P C, Linfield E H, *et al.* Appl Phys Lett, 2003, **83**: 3117–3119
- 10 Jepsen P U, Jacobsen R H, Keiding S R. J Opt Soc, 1996, **13**(11): 2424–2436
- 11 Darrow J T, Zhang X C, Anston D H, *et al.* IEEE J Quantum Electron, 1992, **28**(6): 1607–1616
- 12 Othonos A. J Appl Phys, 1998, **83**: 1789–1830
- 13 Shen Y, Upadhy P, Linfield E, *et al.* Appl Phys Lett, 2003, **83**: 3117–3119
- 14 Shen Y, Upadhy P, Beere H, *et al.* Appl Phys Lett, 2004, **85**: 164–166
- 15 Salem B, Morris D, Aimez V, *et al.* Semicond Sci Technol, 2006, **21**: 283–286
- 16 Mikulics M, Michael E A, Marso M, *et al.* Appl Phys Lett, 2006, **89**: 071103
- 17 Tani M. Meas Sci Technol, 2002, **13**: 1739–1745
- 18 Exter M Van, Fattinger Ch, Grischkowsky V. Opt Lett, 1989, **14**(20): 1128–1130

## Restoration of an electrical breakdown Terahertz emitter by 2 MeV He<sup>+</sup> ion implantation

YANG Kang MA Mingwang CHEN Xiliang ZHU Zhiyong

(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** The irradiation of solids by energetic particles may cause extensive displacement cascades and point defects (vacancies and interstitials), and can be widely used for material modification. In order to repair an electrical breakdown photoconductive antenna (PCA), we irradiated the (100)-oriented, low-temperature (LT) grown GaAs substrate with  $10^{16}/\text{cm}^2$  of 2 MeV helium ions. After being implanted, electric resistance of the PCA has increased from 800  $\Omega$  to 60 M $\Omega$ . The irradiated PCA exhibits improvements in the output power in comparison with the electrical breakdown PCA and its signal intensity has increased from 2 nA to 8 nA. Accordingly, its output power has become more than one order of magnitude higher than that before irradiation. The frequency range of PCA has obviously improvement.

**Key words** Ion irradiation, THz spectra, Photoconductive antenna

**CLC** O77, O433