

文章编号: 1672-8785(2009)07-0037-05

光生等离子体菲涅尔波带板天线

张智光 柯尊贵 周晓军 张旨遥 傅作明

(电子科技大学光电信息学院, 四川成都 610054)

摘 要: 本文描述一种光生等离子体菲涅尔波带板天线的设计方法。利用中心波长为 808nm 的近红外激光器阵列通过光学掩膜(菲涅尔波带板的照相底片)照射高电阻率的硅片, 使硅片呈现出菲涅尔波带板的衍射特性, 实现对入射毫米波的聚焦。给出了这种天线在 94GHz 处的实验验证, 并得到了 4dB 的天线增益效果。

关键词: 光注入; 介电常数; 菲涅尔波带板; 激光器阵列

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A

Photoinduced Plasma Fresnel Zone Plate Antenna

ZHANG Zhi-guang, KE Zun-gui, ZHOU Xiao-jun, ZHANG Zhi-yao, FU Zuo-ming

*(School of Opto-electronic Information, University of Electronic Science and
Technology of China, Chengdu 610054, China)*

Abstract: The design method of a photoinduced plasma Fresnel zone plate antenna is described. A near infrared laser array with its central wavelength of 808 nm is used to illuminate a high resistivity silicon wafer through an optical mask (the negative of a Fresnel zone plate). Then, the illuminated silicon wafer exhibits the diffraction characteristics of the Fresnel zone plate and hence realizes the focusing of the incident millimeter wave. This antenna is verified experimentally at the frequency of 94GHz and its gain is up to 4dB.

Key words: optical injection; dielectric constant; Fresnel zone plate; laser array

1 引言

照射在半导体上的入射光的光子能量等于或大于半导体能隙宽度时, 价带电子吸收光子能量并通过带间跃迁到达导带, 同时在价带留下等量的空穴^[6,12], 称为光生等离子体。通过光注入的方法控制半导体材料的电子特性制成的高速半导体器件的应用研究已经有过很多报道^[1-5]。例如, 2004 年, 江晓清等人设计了一种基于 GaAs 中光生载流子注入效应的 X 结全内反射型(TIR)全光开关, 消光比达到 30dB, 串音小于 -30dB, 开关速率可达 $10^0\text{ns} \sim 10^2\text{ns}$ ^[7]; 2004 年, Wilson R A 等人利用硅基集成电路

(SOI)材料的非线性光学效应设计并制作了微环谐振腔全光开关, 开关速度可达 500ps^[8]; 2006 年, M.R. Chaharmir 等人设计了光控反射阵列天线^[9]。

本文研制了一种光生等离子体菲涅尔波带板天线, 利用近红外光源对半导体材料的参数调制作用使硅片对入射电磁波呈现菲涅尔波带板天线的特性。目前已经在 94GHz(自由空间的波长为 3.2mm)处得到了初步实验验证, 这种设计适用于更宽的频率范围。

2 理论分析

半导体材料吸收光子能量后会产生非平衡

收稿日期: 2009-03-08

作者简介: 张智光(1984-), 男, 北京人, 硕士研究生, 主要研究方向是光生等离子体效应。E-mail: zhiwen_123@163.com

的电子-空穴对,称为光生等离子体,它将使材料的复介电常数发生变化。复介电常数又会引起材料光学常量(折射率 n 和消光系数 κ) 的变化。根据 Drude 模型,复介电常数^[10] 可以表示为

$$\tilde{\varepsilon}_r = \varepsilon_r \left[1 - \frac{\omega_n^2}{\omega(\omega + i\tau_n^{-1})} - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\tau_p^{-1})} \right] \quad (1)$$

式中, ω 为信号电磁波的角频率, ε_r 为半导体无光注入时由束缚电子引起的相对介电常数, τ_n 和 τ_p 分别为光生“自由电子”和“自由空穴”的平均碰撞时间, ω_n 和 ω_p 分别为光生“自由电子”和“自由空穴”的等离子体频率: $\omega_{n,p} = \sqrt{Ne^2/m_{n,p}^* \varepsilon_0 \varepsilon_r}$, 式中 e 为电子电量, ε_0 为真空中的介电常数, m_n^* 和 m_p^* 分别为光生“自由电子”和“自由空穴”的有效质量, N 为光生等离子体的浓度。折射率 n 和消光系数 κ 可以表示为

$$\begin{aligned} n(N) &= \text{Re}[\tilde{\varepsilon}_r \sqrt{N}] \\ \kappa(N) &= \text{Im}[\tilde{\varepsilon}_r \sqrt{N}] \end{aligned} \quad (2)$$

实验中使用的半导体材料是高电阻率的硅片(直径为 85mm, 厚度为 0.7mm), 在分析光注入硅片的模型中设硅片宽度为 $2w$, 厚度为 d , 光从上方垂直入射到硅片表面, 如图 1 所示。

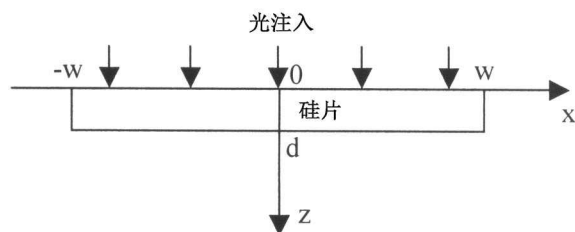


图 1 半导体基片照射图

由于 $w \gg d$, 侧面的表面复合可以不考虑, 光生等离子体的输运可以看作是一维的, 光生等离子体浓度在体内及表面随距离 z 和时间 t 的变化分别满足

$$\begin{aligned} \frac{\partial N(z,t)}{\partial t} &= D \frac{\partial^2 N(z,t)}{\partial z^2} - \frac{N(z,t)}{\tau} \\ &+ \frac{I_0 \lambda}{hc} (1-R) \beta \alpha \exp(-\alpha z) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} D \frac{\partial N(z,t)}{\partial z} \Big|_{z=0} &= sN(z,t) \Big|_{z=0} \\ D \frac{\partial N(z,t)}{\partial z} \Big|_{z=d} &= -sN(z,t) \Big|_{z=d} \end{aligned} \quad (4)$$

(3) 式右边第一项表示光生等离子体的双极扩散运动; 第二项表示电子与空穴在半导体中复合使光生等离子体浓度减小的物理过程; 第三项表示硅片吸收光产生非平衡载流子的过程。式中 τ 为光生等离子体的寿命, λ 为入射波长, I_0 为入射光强, c 为真空中的光速, h 为普朗克常数, R 为半导体表面的反射率, β 为半导体的量子效率, α 为半导体对入射光的吸收系数, s 为表面复合速率。双极扩散系数 D 由电子扩散系数 D_n 和空穴扩散系数 D_p 决定, 其中

$$D = 2D_n D_p (D_n + D_p)$$

$$D_{n,p} = k_0 T \mu_{n,p} / e$$

式中, μ_n 和 μ_p 分别为电子和空穴的迁移率。

计算中将上述参数的值取为: $\varepsilon_r = 12.5$, $m_n^* = 0.26m_0^*$, $m_p^* = 0.39m_0^*$, $m_0^* = 9.1 \times 10^{-31} \text{kg}$, $\mu_n = 1500 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, $\mu_p = 600 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, $s = 1000 \text{cm/s}$, $\tau = 1 \times 10^{-3} \text{s}$, $\alpha = 850 \text{cm}^{-1}$, $\beta = 0.7$, $R = 0.3$, $\lambda = 808 \text{nm}$, $I_0 = 600 \text{mW/cm}^2$ 。

图 2 和图 3 为光注入硅片后的稳态光生等离子体浓度 N 、折射率 n 和消光系数 κ 的纵向分布。图中分别给出了在 200mW/cm^2 、 600mW/cm^2 和 1200mW/cm^2 三种光强下的参数分布情况。实验中只使用了 600mW/cm^2 的光源, 这里给出另外两种光照强度下的参数变化情况作为比较。可以看出, 光源的光照强度越大, 硅片中光学常数的变化越大。

从图 3 中可以看出, 在光照强度为 600mW/cm^2 时, 光注入引起的硅片折射率 n 的变化增量 $\Delta n = n_{\max} - n_{\min} = 0.0406$ (增量变化很小), 而消光系数的变化增量 $\Delta \kappa = \kappa_{\max} - \kappa_{\min} = 0.7581$ 。计算实验中使用的频率为 94GHz 的毫米波入射到硅片后的强度衰减可通过积分 $e^{\int_0^d -2\omega \kappa x / c dx}$ 得到, 其中 ω 为毫米波的角频率, c 为光在真空中的速度, x 为硅片的纵向长度变量。由此得到光注入后的硅片对入射毫米波强度的透射率为 11.4% 。

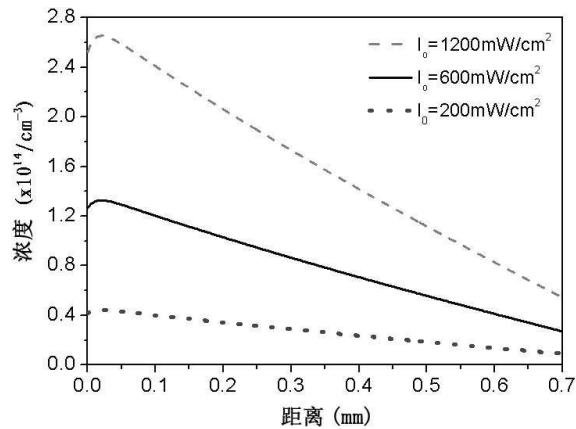
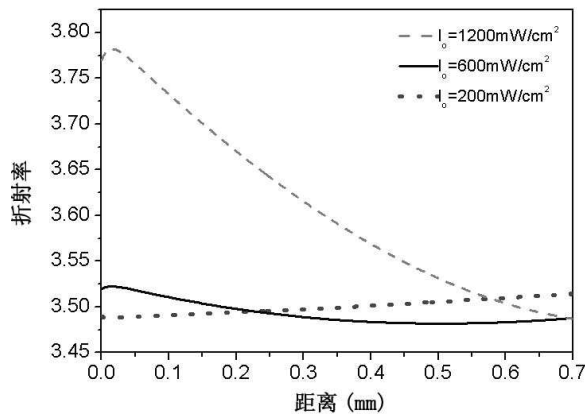
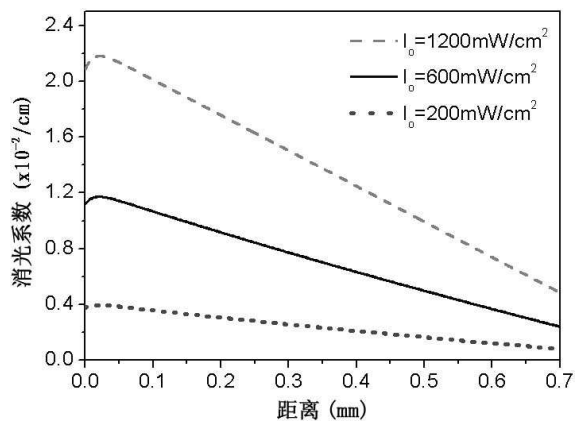


图2 光注入硅片后的稳态光生等离子体浓度 N 的纵向分布



(a) 折射率 n 的纵向分布



(b) 消光系数的纵向分布

图3 光注入后硅片的光学常数分布

3 光生等离子体菲涅尔波带板的设计

3.1 菲涅尔波带板的设计

普通的菲涅尔波带板由一系列透电磁波(介质)和不透电磁波(金属)的圆形环带构成,相邻的波带片环带之间的光程差为半波长的整数

倍^[11]。如图4所示,点波源 S 和探测器 S' 分别位于波带板轴的两侧,假设第 K 个半波带的外缘点为 Q ,那么 S 和 S' 之间应该满足条件

$$(SQ + QS') - (SO + OS') = \frac{K\lambda}{2} \quad (5)$$

这样由点源 S 发出的毫米波通过菲涅尔波带板后将在探测器所在的 S' 处发生相长干涉。

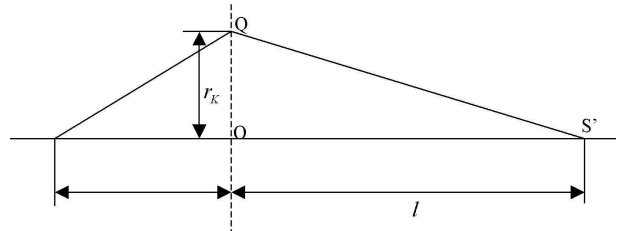
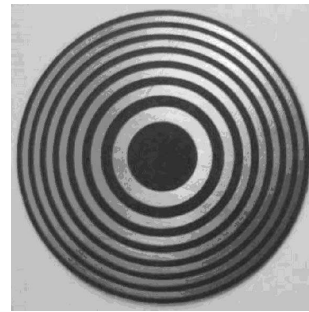
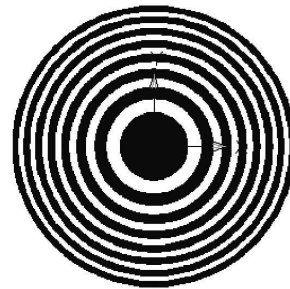


图4 点波源在有限远处照射菲涅尔波带板

图5(a)所示为一工作在94GHz处的菲涅尔波带板(直径为85mm),图5(b)为5(a)中菲涅尔波带板1:1比例的照相底片,即底片中的环带与波带板中对应环带的尺寸参数完全相同。



(a) 工作频率为94GHz的菲涅尔波带板



(b) 菲涅尔波带板1:1比例的照相底片

图5 94GHz 菲涅尔波带板及其照相底片

3.2 光生等离子体菲涅尔波带板的设计

众所周知,所有的材料对于电磁波都有衰减作用,这主要取决于材料的特性和入射电磁

波的频率。若衰减长度 δ 小于材料的厚度 d , 电磁波将被有效地阻挡。在实际中, 任何厚度的金属都会极大地衰减电磁波的强度, 高电阻率的半导体材料和绝缘材料对电磁波的衰减很小。

半导体材料对电磁波强度的衰减取决于材料的消光系数 κ 。采用适当的光源照射半导体材料可以实现对 κ 的控制, 从而达到对衰减长度 δ 控制的目的。若硅片上未被光照射的部分满足 $\delta_{dark} \gg d$, 同时被光照射部分满足 $\delta_{light} \ll d$, 就可以形成菲涅尔波带板结构^[3]。

将硅片与图 5(b) 所示的菲涅尔波带板的照相底片重叠起来 (二者的直径都是 85mm), 然后用激光器阵列通过上述照相底片照射硅片, 就构成了光生等离子体菲涅尔波带板的结构, 如图 6 所示。测试表明, 照相底片和硅片对毫米波的损耗可以忽略不计。底片是通过在透明的基片上涂敷黑色的不透光材料制成的, 使得在激光器阵列的照射下, 对应于底片中黑色区域的硅片部分 (未受到光照, 消光系数 κ 不变) 透毫米波, 而底片中透明区域对应的硅片部分 (在光照作用下, 消光系数 κ 发生变化) 对毫米波不透。因此, 在图 6 所示的光生等离子体菲涅尔波带板结构中, 当 $\delta_{light} \ll d$ 时, 入射毫米波被极大地衰减, 使得硅片呈现出图 5(a) 中菲涅尔波带板的特性。

4 测量光生等离子体菲涅尔波带板天线的增益

实验中使用的激光器阵列 (LD 阵列) 由 182 个中心波长为 808nm、输出功率为 200mW 的半

导体激光器构成。图 6 所示的光生等离子体菲涅尔波带板天线由激光器阵列、图 5(b) 中菲涅尔波带板的底片和高电阻率硅片三部分组成。这样形成的光生等离子体菲涅尔波带板天线与图 5(a) 中的菲涅尔波带板天线具有相同的物距、像距和焦距关系 (二者的环带尺寸相同)。

用信号发生器、倍频器和直波导产生 94GHz 的毫米波点源信号, 将光生等离子体菲涅尔波带板天线作为接收天线, 馈源采用圆锥喇叭, 实验系统图如图 6 所示。测得的光生等离子体菲涅尔波带板天线的增益为 4dB。

现阶段光生等离子体菲涅尔波带板天线的增益不高, 主要是硅片上被光注入的部分对入射毫米波的衰减还不够大 (光功率不足导致硅片中消光系数 κ 不够大), 使得透过的杂波影响天线的聚焦效果。进一步的实验工作将采用输出光功率更大且响应速度快的光源利用短脉冲驱动的办法^[1]来改善天线的增益效果。

5 结论

建立了光注入硅片后引起材料的复介电常数变化的一维理论模型。利用光注入硅片后对材料光学参数 (消光系数 κ) 调制的方法设计了一种新的天线结构。为了验证光生等离子体菲涅尔波带板天线结构的可行性, 本文设计了一种工作频率为 94GHz 的光生等离子体菲涅尔波带板天线, 并在实验中得到了 4dB 的增益效果。

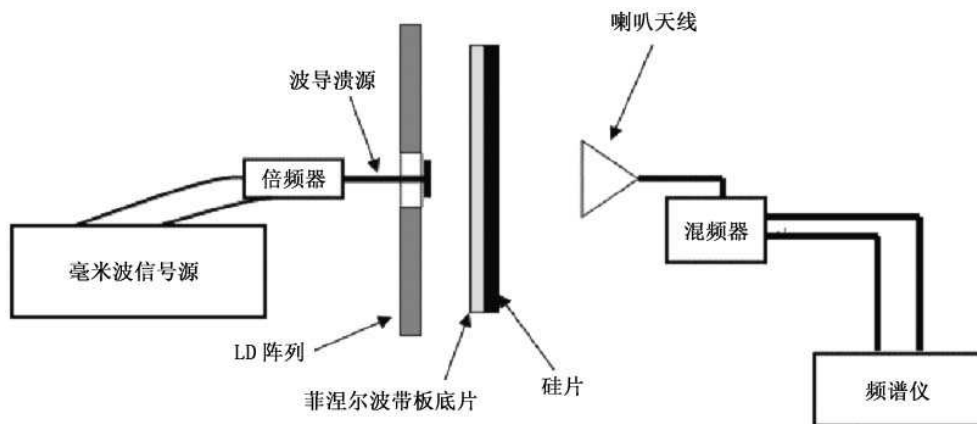


图 6 光生等离子体菲涅尔波带板天线实验系统图

参考文献

- ## 参考文献
- [1] G F Brand. Remote millimeter-wave beam control by the illumination of a semiconductor [J]. *IEEE Trans.on Microwave Theory and Techniques*, 2000, **48**(5): 855–857.
 - [2] M Matsumoto, M Tsutsumi, N Kumagai. Radiation of millimeter waves from a leaky dielectric waveguide with a light-induced grating layer [J]. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, 1987, MTT-35: 1033–1042.
 - [3] M R Chaharmir, J Shaker, M Cuhaci, et al. Novel Photonically-Controlled Reflectarray Antenna [J]. *IEEE Trans.on Antennas and Propag.*, 2006, **54**(4): 1134–1141.
 - [4] M R Chaharmir, J Shaker, M Cuhaci, et al. Reflectarray with variable slots on ground plane [C]. *IEE Proc. Microw. Antennas Propag.*, 2003, **150**(6): 436–439.
 - [5] C H Lee, P S Mark, A P DeFonzo. Optical control of millimeter-wave propagation in dielectric waveguides [J]. *IEEE J. Quantum Electron*, 1980, QE-16: 336–338.
 - [6] 钱士雄, 王恭明. **非线性光学 —— 原理与进展** [M]. 上海: 复旦大学出版社, 2001.
 - [7] 陈克坚, 杨爱龄, 唐奕, 等. 光注入 X 结 GaAs 全光开关的设计 [J]. **光电子 · 激光**, 2004, **15**(4): 406–409.
 - [8] Vilson R A, Carlos A B, Roberto R P. All optical control of light on a silicon [J]. *Natural*, 2004, **431**(28): 1081–1084.
 - [9] M R Chaharmir, J Shaker, M Cuhaci, et al. Broad-band reflectarray antenna with double cross loops [J]. *Electronics Letters*, 2006, **42**(2): 65–66.
 - [10] J S Moss, G J Burrell, B Ellis. *Semiconductor optoelectronics* [M]. Butterworths, 1973.
 - [11] 窦文斌. **毫米波准光原理与技术** [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

~ ~ ~ ~ ~

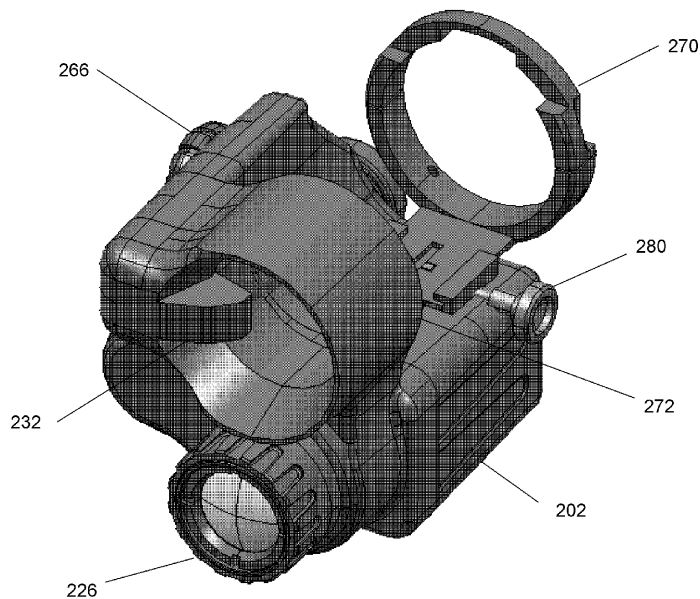
专利 Patent

可用夹子夹上去的红外成像器

美国专利 US7541581
(2009年6月2日授权)

本发明提供一种可用夹子夹上去的红外成像器，它既可以与现有的夜视系统相连接，又可以与该夜视系统相分离。当需要为夜视系统增加红外成像功能时，只要将该红外成像器连接在夜视系统上，夜视系统便能提供融合的图像。

本专利说明书共 12 页, 其中有 7 张插图。



高 编译