

The Imaging Characteristics and Key Technology of Electron Bombarded CCD

Xuanni Zhang

School of Physics and Electronic Engineering, Xianyang Normal University, Xianyang Shaanxi
Email: moishel@163.com

Received: May 21th, 2017; accepted: Jun. 4th, 2017; published: Jun. 8th, 2017

Abstract

The incident light of back-illuminated CCD is incident from its back, and avoids loss of light by electrode as positive incident, thus the quantum efficiency is high. The back-illuminated CCD is the key component of EBCCD, with high gain, low noise, etc. The structure and imaging features of EBCCD (Electron Bombarded CCD) is analyzed, and then the key manufacturing process of EBCCD is highlighted: Thinning technology and the back treatment. The purpose of thinning is to remove the silicon substrate passive part evenly, so that low-light or electronic signals back from the CCD chip directly into the active region, and can lower the recombination of signal carrier. The main purpose of the back treatment is to establish a strong electric field, in order to reduce the signal electron loss by surface composite carrier, so gain can get the maximum gain in the allowed maximum voltage. Thinning process is used only in CCD photosensitive area, and the other area needn't thinning process. The thickness of the substrate can be thinned to 8 μm , and the entire photosensitive surface has good uniformity; With boron ion implantation annealing treatment of the back, gain control can be achieved in 2000.

Keywords

Back-Illuminated CCD, Imaging Links, Thinning Technology, The Back Treatment, Gain

EBCCD的成像特性及其制作工艺

张宣妮

咸阳师范学院物理与电子工程学院, 陕西 咸阳
Email: moishel@163.com

收稿日期: 2017年5月21日; 录用日期: 2017年6月4日; 发布日期: 2017年6月8日

摘要

背照式CCD的入射光是从其背面入射, 避免了正面入射时电极对光的损耗, 因而量子效率高。以背照式

CCD为核心器件的EBCCD,具有增益高,噪声小等特点。在简要分析了EBCCD的结构和成像特点基础上,着重介绍了EBCCD的关键制作工艺:减薄和背面处理。减薄的目的是要均匀地去除硅衬底的无源部分,使光信号从CCD背面直接注入到芯片的有源区,减少信号载流子的复合几率。背面处理的主要目的是在CCD基片内建立较强的电场,以减少表面载流子复合所引起的信号电子损失,使增益在容许的最大电压下到达最大值。减薄工艺中采用仅减薄CCD的光敏区,其它面积不减薄法,可以将基片厚度可减薄到8 μm ,且整个光敏面的均匀性好;硼离子注入退火的背面处理法,使增益控制范围可达到2000。

关键词

背照式CCD, 成像环节, 减薄, 背面处理, 增益

Copyright © 2017 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着科学技术的发展,在天文学、国防科技、航空航天等众多应用领域中,对成像器件的分辨力和灵敏度的要求越来越高。常见的微光实时成像的方式有两种:一种是通过真空摄像器件,另一种是固体摄像器件,如增强型电荷耦合器件(ICCD)、电子轰击式电荷耦合器件(EBCCD)和电子倍增电荷耦合器件(EMCCD)。随着新型半导体材料的出现及微细加工技术的发展,固体摄像器件优点日益凸现[1]。

根据结构和工艺的不同,CCD分为前照式和背照式(BCCD)。一般前照式CCD感光时,入射光是从MOS结构的正面进入,即由带有复杂金属电极或多晶硅电极结构的 SiO_2 层射入。而背照式CCD(BCCD)刚好相反,光子由CCD背面的单晶硅层射入,避免了金属电极对光的反射和多晶硅电极以及 SiO_2 层对光的吸收,故能获得较高的量子效率,从而提高CCD的感光灵敏度。图1是一般前照式CCD与背照式CCD的量子效率的对比[2]。可见,无论感光灵敏度还是光谱响应宽度,背照式CCD都比前照式CCD要高要宽。

前照式CCD中光线从电极一面入射,CCD的量子效率比较低,短波响应差,在很多方面满足不了探测和成像要求。在BCCD中,光线从无电极的背面入射,量子效率高,对微弱光、短波有比较好的响应灵敏度。BCCD通常具有足够薄的衬底厚度,使得弱光信号或电子能从CCD背面直接注入到芯片的有源区,这样不但可以大大提高CCD的量子效率,而且对波长从0.1~1000 nm的光子以及高能量带电荷粒子都很灵敏[3]。而ICCD和EBCCD由于具有很大的增益,灵敏度比ICCD进一步提高,甚至可以达到单光子探测。

本文首先介绍了前照式CCD、BCCD、ICCD以及EBCCD的成像特点,然后分析了ICCD和EBCCD的结构和成像环节及特点,并详细介绍了EBCCD的关键制备工艺和应用。

2. EBCCD的成像特性分析

ICCD结构如图2所示,其成像过程是:低照度景物的光子图像投射在ICCD光学输入窗内侧的光阴极面上发生光电转换而逸出光电子;光电子通过电子聚焦装置被聚焦到微通道板(MCP/Micro Channel Plate)上,并经MCP倍增后轰击荧光屏;荧光屏输出的光子图像通过光学中继透镜或是光纤器件被耦合到CCD上;CCD再次把光子图像转换成电子信号,最后由其外围的电子电路读出并进行相应的处理和

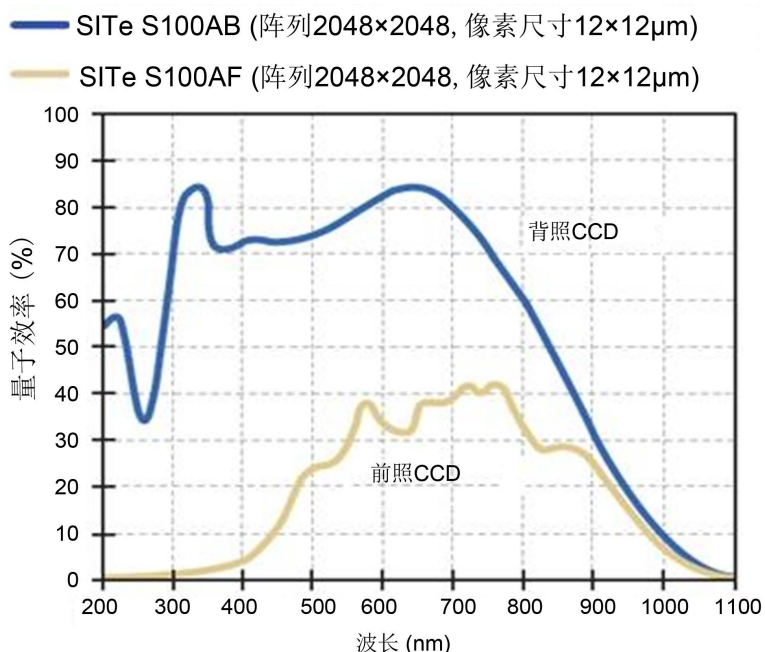


Figure 1. The Comparison of the quantum efficiency of former-illuminated CCD and BCCD [2]

图 1. 前照 CCD 与背照 CCD (BCCD)的量子效率对比[2]

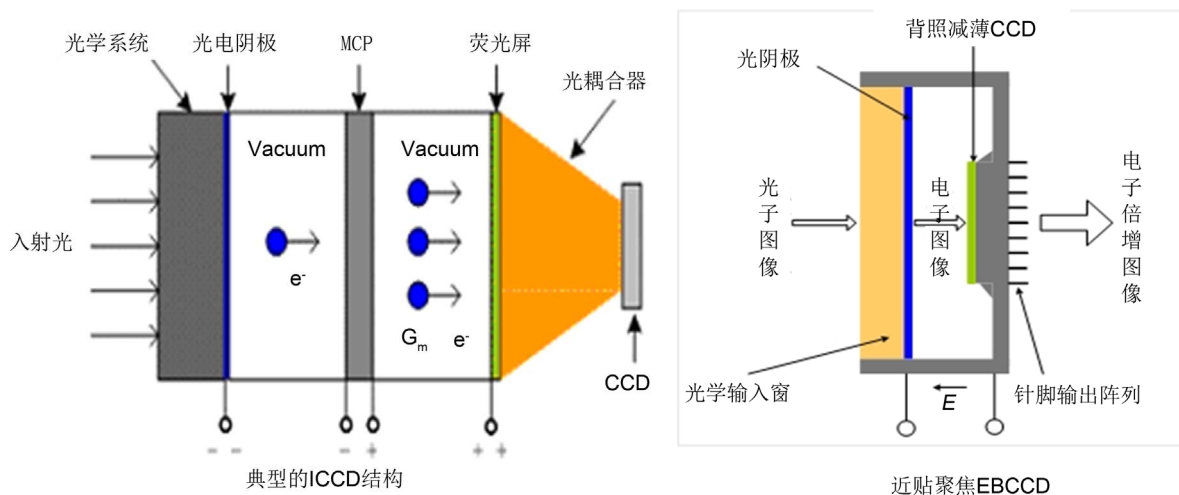


Figure 2. The structure of ICCD and EBCCD

图 2. ICCD 和 EBCCD 结构图

显示。ICCD 的成像过程表现为“光子 - 光生电子 - 倍增电子 - 光子 - 电子”链，显然过多的成像环节会使图像质量逐渐恶化：MCP 的增益过程使噪声被引入图像；光电成像路径中的莫尔条纹、元器件本身的瑕疵以及光纤阵列的不均匀性等；光学元器件中的能量损耗及弥散会使 ICCD 的 MTF (调制传递函数)进一步下降[3] [4]。

在传统的 ICCD 结构基础上，用背照减薄式 CCD 取代 ICCD 中的荧光屏，同时去除 ICCD 中的 MCP 和光学耦合器件，便可制得 EBCCD。EBCCD 减少了 ICCD 中的图像传输链，成为“光子 - 光生电子 - 电子”链。当光生电子轰击在减薄式 CCD 的背面时，产生电子 - 空穴对，电子得到增益。由于电子轰击

半导体的噪声要远远低于 MCP 倍增的噪声，因此它能提供几乎无噪声的增益[5]。

EBCCD 的优点是增益高、空间分辨力高、噪声低，在景物照度为 $10^{-4}\sim 10^{-5}$ lx 的环境下仍然可以正常工作，理论上甚至可以探测到单个光子，但是制作工艺复杂。

3. EBCCD 制作工艺

EBCCD 像管的制作是通过一个真空法兰用激光焊接的方式将背照减薄式 CCD 及其封装体与像管主体相连接，然后再进行光电阴极的制作并对像管进行抽空、烘烤及退火处理。EBCCD 像管的制作工艺与一代像管不同的是，管体的抽空、烘烤及退火处理的温度不能高于 320°C ，而这正是该工艺的难点之一[5]。具体的制作步骤如下：①初始(未减薄) CCD 的制作；②CCD 基片测试；③切成薄片；④单片 CCD 基底减薄；⑤背面处理(形成电场与光敏面钝化)；⑥减薄 CCD 的最后测试。CCD 的减薄和背面处理是较为关键的两个技术。

3.1. 减薄

减薄工艺的目的是要均匀地去除硅衬底的无源部分，使弱光信号或电子从 CCD 背面直接注入到芯片的有源区。有源区的厚度通常须在 $20\ \mu\text{m}$ 左右，因此腐蚀的均匀性控制要求相当严格。CCD 的减薄通常有两种方式：①仅减薄 CCD 的光敏区，其它面积不减薄。这一结构适用于单片工艺，并能进行各种背面处理。②对 CCD 的整个面积区域都进行减薄处理并将其耦合到合适的基底上。但只有连续的“冷”或高温脉冲的背面处理才适用于此方案[6] [7]。

CCD 的减薄工艺取决于许多因素，其中起主导作用的是晶体尺寸。下面主要介绍第一种方式：

首先对单块 CCD 基片进行测试与挑选，然后把选中的 CCD 基片用抗酸的环氧树脂粘贴到聚四氟乙烯(Teflon)盘上，基片的边缘同样用环氧树脂防护，但要留出 CCD 的成像面积，即该面积上没有环氧树脂的防护。经过 48 小时的干燥后，将带有基片的 Teflon 盘安装到备有刻蚀液的旋转腔室内。减薄采用的是化学蚀刻的方法，所用的刻蚀液是各向同性的硅刻蚀液，整个刻蚀过程是在旋转圆盘系统上完成的，被刻蚀基片的膜厚是通过周期性的检测其在白光照明下透射光的强度和颜色来控制的。由于运动方式是三维的，因此在膜的边缘处通过刻蚀液流与膜层的交互作用形成一个三维流体(扩散)的边界层。通过这种工艺，可以将基片厚度由 $300\ \mu\text{m}$ 减薄到 $8\ \mu\text{m}$ ，且整个光敏面的非均匀性小于 10% [8]。

3.2. 背面处理

背面处理的主要目的是在 CCD 基片内建立一个不小于 $5 \times 10^3\sim 5 \times 10^4\ \text{V/cm}$ 的电场，以减少由于表面载流子复合所引起的信号电子损失，从而使增益在容许的最大电压下到达最大值。背面处理的方法有很多，如背面放电、闪电选通及脉冲激光退火的离子注入等方法[9]。

北京理工大学光电子工程系的周立伟院士在该工艺中采用的是“硼离子注入及随后退火”的方法。从长期稳定性的观点来看，该方法适于制作用于连续工作的 EBCCD。如能恰当的选择离子注入的剂量和能量，则可得到一个小于 $0.1\ \mu\text{m}$ 的稳定的“死层”，其主要目的使 EBCCD 增益尽可能达到最高值。评价 EBCCD 性能好坏的技术指标通常有二个：一是在容许的最大加速电压下 EBCCD 的增益所能达到最高值；二是在容许的最小加速电压下 EBCCD 的增益所能达到最小值。达到这两个技术指标的 EBCCD 既具有高的灵敏度也具有高的增益控制范围。这种近于“完美”的 EBCCD，其增益在 $10\ \text{kV}$ 的加速电压下可达到 2400 左右，增益控制范围在加速电压从 $2\ \text{kV}$ 变化到 $10\ \text{kV}$ 时可达到 2000。该技术的参数经过优化后，通过其制备的 EBCCD 样品的增益和增益控制范围非常接近于它们的理论极限值[10]。典型的 EBCCD 在 $10\ \text{KeV}$ 的光生电子轰击下的增益值为 2000~2200。

通过减薄和对 CCD 背面进行钝化处理, 可减小光生少子(须收集的电信号)与光生多子复合的几率以提高电荷的收集率, 从而提高量子效率。采用减薄工艺制作的背照式 CCD (BTCCD), 甚至可以获得 90% 的量子效率, 且光谱响应延伸到紫外及软 X 射线区域。如在背照减薄式 CCD 在背面, 即单晶硅层一面, 镀有适当的紫外增透膜, 其在 200 nm 附近的量子效率可达 50% [11] [12]。

4. 结束语

减薄工艺和背面处理是 EBCCD 的两大关键工艺技术, 这两项技术还在不断的发展完善中。EBCCD 可极大的弥补人眼在分辨率、灵敏度、光谱响应范围等方面的局限, 因此被广泛的应用于天文学、高能物理、生命科学、空间探测以及武器装备等众多学科领域, 尤其是在空间探测和武器装备这两大应用领域。

CCD 器件经过几十年的发展, 其性能得到不断的改进, 比如: 可以提高电荷转移效率的埋沟器件、抗晕器件、用于降低暗电流的反相模式、用于提高量子效率的背射减薄加抗反射膜处理、加紫外转换层以扩展器件对紫外区的响应以及用于 X 射线探测的深耗尽器件等[13] [14]。然而性能良好的背照减薄 CCD 的工艺还有很多技术瓶颈。最近, 人们主要集中在通过将灵敏度提高到 15 $\mu\text{V}/\text{e}$ 来降低噪声: 通过使用 ITO 等透明电极材料来提高前照式 CCD 的量子效率; 在由更高时钟脉冲驱动的输出寄存器中利用碰撞电离实现电荷倍增, 可以确保 EBCCD 在非常低的光照条件下无需增强器采集信号。随着人们对 CCD 的工作过程认识的不断深入和工艺的提高, 其性能将会得到不断的完善。

参考文献 (References)

- [1] 王庆有, 孙学珠. CCD 应用技术[M]. 天津: 天津大学出版社, 1993.
- [2] 王书宏, 胡谋法, 陈曾平. 天文 CCD 相机的噪声分析与信噪比模型的研究[J]. 半导体光电, 2007, 28(5): 731-734.
- [3] Dalinenko, I.N., Kossov, V.G., Lazovsky, L.Y., *et al.* (1995) Design and Fabrication Technology of Thinned Backside Excited CCD Imagers and the Family of the Intensified Electron-Bombarded CCD Image Tubes. *SPIE*, **2551**, 197-205.
- [4] 戴丽英, 刘德林, 李慧蕊, 等. 背照式电荷耦合器件的研制[J]. 光电子技术, 2005, 25(3): 146-149.
- [5] 左舫, 刘广荣, 高雅允, 等. 用于微光成像的 BCCD, ICCD, EBCCD 性能分析[J]. 北京理工大学学报, 2002, 22(1): 109-112.
- [6] 刘广荣, 左舫, 周立伟, 等. EBCCD 的增益及信噪比研究[J]. 光学技术, 2002, 28(2): 120-122.
- [7] 武利翻. CCD 制造的关键工艺[J]. 传感世界, 2005, 2: 65-69.
- [8] Janesick, J.R. (2001) *Science Charge—Coupled Devices*. SPIE Press, 10-30.
- [9] 王庆有. 图像传感器应用技术[M]. 天津: 电子工业出版社, 2003: 30-35.
- [10] 刘继琨. 固体摄像器件的物理基础[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1989: 116-134.
- [11] Quirk, M., Serda, J. 半导体制造技术[M]. 韩郑生, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2009. (In Chinese)
- [12] 张宣妮, 鲁帆. CCD 成像探测器的新发展[J]. 硅谷, 2008(21): 12-13.
- [13] 刘广荣, 周立伟, 王仲春, 等. 背照明 CCD 微光成像技术[J]. 红外技术, 2000, 22(1): 8-12.
- [14] 张磊, 张晓玉, 张福甲, 等. 硅基光子晶体板的光刻和反应离子刻蚀[J]. 光电工程, 2004, 31(2): 1-3.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：oe@hanspub.org