

Study of Etching for Mesa-isolated InP/InGaAs Avalanche Photo Diode

Xia Wei¹, Deng Jun¹, Mou Tong¹, Du Yujie¹

1. Laboratory of Beijing Photoelectron Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

[†]Email: dengsu@bjut.edu.cn

Abstract

The difference of the side wall and surface morphology about mesa-isolated InP/InGaAs avalanche photodiodes (APD), which were manufactured by ICP etching and wet etching respectively, was compared. And the influence of the dark current and breakdown voltage between ICP etching and wet etching was compared too. Under the conditions of $\text{Cl}_2/\text{Ar}_2/\text{CH}_4$, the surface of InP with inductively coupled plasma (ICP) etching turned to be rough, and the cause of this formation was investigated. This paper mainly improved the surface morphology by optimizing the ICP etching time and power, which raised the temperature of the etched surface to ensure the stability of the etching and confirmed the stable conditions to manufacture In/InGaAs APD. And the mesa-isolated APD with good performance was finally manufactured.

Keywords: APD; InP/InGaAs; ICP; Mesa-isolated; dark current

台面型 InP/InGaAs 雪崩光电二极管刻蚀工艺研究

夏伟¹, 邓军¹, 牟桐¹, 杜玉杰¹

1. 北京工业大学北京市光电子技术实验室, 北京 100124

摘要: 对比了 ICP 刻蚀和湿法腐蚀制备台面型 InP/InGaAs 雪崩光电二极管 (APD) 时侧壁、表面形貌的不同, 以及对暗电流和击穿电压的影响。在 $\text{Cl}_2/\text{Ar}_2/\text{CH}_4$ 条件下感应耦合等离子体 (ICP) 刻蚀 InP 会出现表面粗糙, 对其原因进行了探究。并主要对 ICP 的刻蚀时间和刻蚀功率进行了优化, 提高刻蚀表面的温度, 保证了刻蚀的稳定性并改善了 InP 刻蚀表面的形貌, 确定了稳定制备 APD 器件的刻蚀条件, 最终制备出性能优良的台面型 APD 器件。

关键词: 雪崩光电二极管 (APD); InP/InGaAs; ICP; 台面型; 暗电流

引言

雪崩光电二极管 (APD) 是一种通过光生载流子在二极管耗尽层内的碰撞电离效应来获得雪崩倍增的半导体光电子器件。内部的雪崩倍增让 APD 器件能够具有较高内部增益, 可以减少外部放大电路的使用, 使得 APD 可以达到较高的响应速度, 因而在光通信和红外成像领域有极好的应用前景^[1~4]。

对于光电二极管, 即使在没有光照的情况下, 仍然存在微弱的电流信号, 这主要是因为半导体内部的各种热效应, 如热电子发射同样会产生自由载流子, 这些自由载流子在外电场的作用下便会产生电流。这种无光照时在电路上流动的电流称之为暗电流。暗电流作为噪声, 对光探测是不利的, 应尽量减小^{[5][6]}。

对于 APD 来说, 暗电流分为本体暗电流和表面暗电流, 其中表面暗电流由表面缺陷、清洁度、偏置电压和器件表面积决定。相对平面型器件, 在台面型器件制备中, 台面刻蚀后 APD 器件台面和侧壁的形貌及刻蚀可能产生的副产物对暗电流的抑制有着重要的影响^{[7][8]}。

台面刻蚀技术的目标是既要有较高的图形保真度又要减小横向钻蚀, 主要有湿法和干法刻蚀两种技术。湿法刻蚀便于实验、损伤较小, 选择合适的腐蚀液可达到对不同材料的高选择比, 但湿法刻蚀对材料为各向同性腐蚀, 在刻蚀较高台面时横向钻蚀严重。干法刻蚀具有良好的各向异性和可控性、图形保真度

高和均匀性良好的特点，因此近几年来对干法刻蚀研究的较多。

感应耦合等离子刻蚀(ICP)是近年来发展的一种干法刻蚀技术，是利用射频电源使反应气体生成反应活性高的离子和电子，对基片进行物理轰击和化学反应来达到刻蚀的目的。在制备台面型探测器方面具有均匀性良好和图形保真度高的优点，但是刻蚀会引入损伤，增加探测器的暗电流水平^[9]。通过对刻蚀气体配比、腔室压力、RF 功率、温度等参数的调整，能够减少反应的副产物并保持刻蚀后台面和侧壁形貌的平整^[10]。

文中对 InP 基 APD 器件的台面刻蚀，主要采用了“干湿干”的刻蚀方法和纯干法刻蚀的方法，并比较两种方法对 APD 器件性能的影响。另外，对 InP 进行 ICP 刻蚀时会形成难以挥发的 InCl_x，影响刻蚀的形貌，本文针对这个方面进行了优化。并用优化后的条件制备出了性能优良的 APD 器件

1 对比两种刻蚀方法对APD器件的影响

1.1 实验

刻蚀样品为 InP 基 APD 器件，其结构如表 1 所示，需要刻蚀到样品的接触层。样品清洗后，使用 PECVD 沉淀 700nm 的 SiO₂ 作为掩膜。掩膜的刻蚀采用湿法腐蚀，使用的是 HF 和 NH₄F 的混合溶液；腐蚀完成后去胶清洗，准备进行 ICP 刻蚀实验。

表 1 APD 器件结构

结构	厚度 (nm)
InGaAs 接触层	15
InP 接触层	150
InP 倍增层	250
InP 电荷层	170
InGaAsP 渐变层	80
InGaAs 吸收层	2700
InP 接触层	500
InGaAs	
InP 衬底	

本次实验的干法刻蚀部分均采用 Oxford Instrument 公司生产的 Oxford Plasma System 100 型 ICP 刻蚀设备完成，其刻蚀条件为：Cl₂/CH₄/Ar₂ 流量是 6/12/3sccm，腔室压强为 4mTorr，ICP 功率 1000W，RF 功率 150W，温度 25℃。先对样品进行 ICP 刻蚀，刻蚀到 InGaAs 吸收层后将样品解理为样品一、样品二两片，分别进行干法和湿法的刻蚀。样品一采用湿法对 InGaAs 吸收层进行腐蚀，腐蚀液采用 H₃PO₄/H₂O₂/H₂O(配比为 2: 3: 30，室温下腐蚀 InGaAs 速率在 600nm/min 左右，对 InP 材料几乎不腐蚀)。完全腐蚀 InGaAs 后，清洗并进行 ICP 刻蚀，确保刻蚀到 InP 接触层。样品二全程采用 ICP 刻蚀，直至 InP 接触层，刻蚀深度应该保证在 3.37um 到 3.87um 之间。

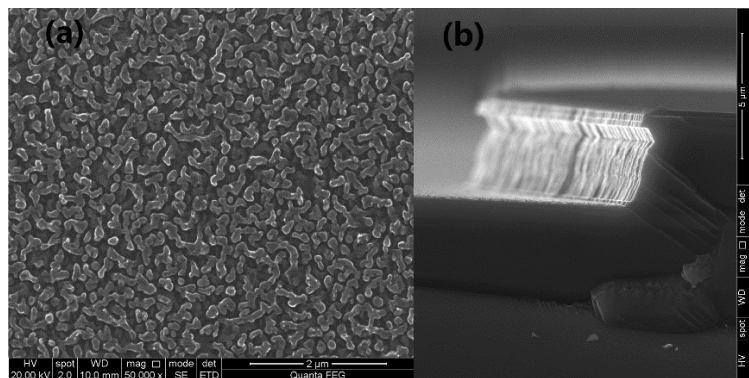
由于 InP 与 InGaAs 材料的 ICP 刻蚀速率不同，在刻蚀 APD 器件的多层结构时需分多次刻蚀，并使用台阶仪测量台阶保证刻蚀深度的准确。

1.2 结果与分析

对样品一、样品二刻蚀完毕后去掉 SiO₂ 层，台阶仪测试样品一、样品二的台阶高度分别为 3.65um 和 3.45um，达到器件要求。从外观上看，两个样品表面颜色发黑，显微镜下观察两者的表面都比较粗糙，呈现颗粒状，样品一的颜色更深，颗粒状的表面形貌更为明显。

经测试发现，采用干湿干方法的样品一在低电压下，漏电流要比纯干法刻蚀的样品二要高，相比于样品二，随着电压的升高样品一的漏电流增加要更大。为进一步确定样品一表面颗粒的组分和成因，以及其与漏电流特性之间的关系，对样品一下表面以及侧向剖面进行了 SEM 扫描，结果如图 1(a)、图 1(b)所示。

图 1(a)中可以看到，样品一的 ICP 刻蚀表面比较粗糙，有大量的不规则颗粒。图 1(b)是刻蚀台面的侧向 SEM 图，可以看出，由于刻蚀的深度较大，使用湿法腐蚀 InGaAs 吸收层的样品一出现了明显的钻蚀，导致最后一次 ICP 对侧壁的刻蚀不均匀，这样的侧壁状态会存在大量的悬挂键和缺陷。表面的悬挂键极易在空气中被氧化，从而改变侧壁的导电特性；APD 器件在较高电压下工作时，侧壁相对与台面中心更容易穿通，导致器件的击穿系能下降^[11]。另外，侧壁存在的大量缺陷会形成电子-空穴的复合中心，导致表面漏电增大，这也是样品一暗电流高于样品二的原因^[12]。



(a)样品一下表面的结果；(b)样品一侧向剖面的结果

图 1 样品一的 SEM 图

在 ICP 工艺中采用 Cl_2 对 InP 进行刻蚀时，会产生难以挥发的 InCl_x ^[13]。 InCl_x 的附着可能会造成图 1(a)中的表面状态。但是随后对样品进行超声、清洗等工艺后，其表面情况并无好转，这也说明表面粗糙可能不是由刻蚀过程中产生的副产物附着在表面造成的，而是刻蚀面不平整。为了验证这一点，我们对下表面使用 EDS（能谱仪，Energy Dispersive Spectroscopy）进行了分析，如图 2 所示。

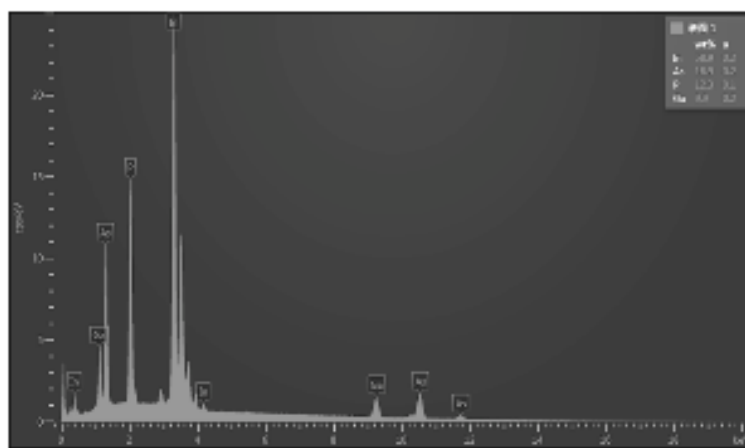


图 2 样品一的 EDS 图像

从图 2 中可以看出，样品表面并没有测出 InP、InGaAs 外的其他成分，这也证明了并没有 InCl_x 附着在样品表面。可以肯定表面粗糙是由于 ICP 刻蚀不均匀造成的，而不是刻蚀副产物的附着。表面的粗糙直接关系到表面漏电流的大小，这也是造成样品一在低偏压下暗电流要高于样品二的原因。

2 刻蚀表面的优化

鉴于使用湿法工艺制备的 APD 器件性能上存在重大缺陷，下面主要优化干法工艺来制备 APD 器件，保

证其性能。

刻蚀 InP 表面出现刻蚀面粗糙的情况，可能与刻蚀 InP 的深度及表面的温度有关。为了优化 InP 刻蚀条件，我们选用表面生长有 340nm 厚 InGaAs 层的 InP 实验片用来进行刻蚀的优化。实验片清洗后，使用 PECVD 沉淀 300nm 的 SiO₂ 作为掩膜。掩膜的刻蚀采用与实验 1.1 相同湿法腐蚀。

刻蚀深度对表面形貌的影响

上述样品被解理成三片，其中的两小片进行湿法腐蚀处理，腐蚀液采用腐蚀液采用 H₃PO₄/H₂O₂/H₂O（配比为 2：3：30）系的腐蚀液，得到完全腐蚀掉 InGaAs 层的 InP 实验片 1(a)、保留 120nm 厚 InGaAs 层的实验片 1(b)，连同未进行腐蚀、保留 340nm 厚 InGaAs 层的 InP 实验片 1(c)同时进行 ICP 刻蚀。ICP 刻蚀条件与实验 1.1 中的条件保持一致，首先刻蚀 20s，然后继续刻蚀 60s，分别记录下表面情况及刻蚀深度。

表 2 实验片 1 刻蚀时间与刻蚀深度的结果

	剩余InGaAs厚度 (um)	刻蚀前台阶高度 (um)	进行20sICP的刻蚀深度 (um)	进行60sICP的刻蚀深度 (um)
实验片1 (a)	0.00	0.66	0.08	0.87
实验片1 (b)	0.11	0.53	0.07	0.79
实验片1 (c)	0.34	0.31	0.05	0.66

实验片 1(a)、(b)、(c)刻蚀情况如表 2 所示，在 ICP 刻蚀时还有一片 InP 衬底作为陪片一同进行实验，用来区别腐蚀过程对 InP 刻蚀表面的影响。图 3 是显微镜下刻蚀 20s 后三个样品表面面状态。实验片 1(c)未能刻穿表面的 InGaAs 层，其外观在低倍显微镜视野下是最为明显的，在高倍显微镜下也没有明显的颗粒，表面平滑。实验片 1(b)考虑到掩膜的刻蚀速率(80nm/min)，已经刻蚀到 InGaAs/InP 界面处，外观略发暗，高倍显微镜下有明显颗粒。实验片 1(a)刻蚀的最深，颜色最暗，表面也是最粗糙的。InP 衬底（陪片）的表面情况与实验片 1(a)基本一致，可以排除湿法腐蚀后表面对 ICP 刻蚀的影响。实验结果表明短时间 ICP 刻蚀时，随刻蚀深度的增加，InP 表面的会更加粗糙，而刻蚀 InGaAs 不会出现表面粗糙的情况。

图 4 是实验片 1 刻蚀 60s 后的显微图像。实验片 1(a)、(b)的表面粗糙均明显减小，实验片 1(c)仍保持较好的表面平滑程度。这说明 InP 刻蚀深度并不直接影响刻蚀表面的粗糙程度。考虑到在使用 Cl₂、CH₄、Ar 对 InP 进行 ICP 刻蚀时，会产生难以挥发的 InCl_x，其气化温度在 600℃，如果 InCl_x 不能及时挥发就会造成刻蚀不均匀进而导致表面粗糙，因此影响表面粗糙的因素可能是刻蚀时 InP 的表面温度。

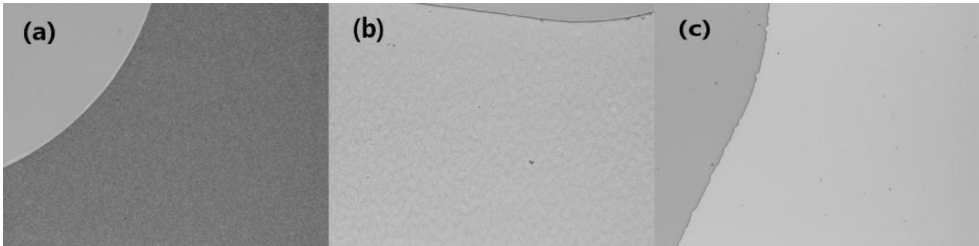


图 3(a)、(b)、(c)依次为实验片 1 (a) (b) (c) 刻蚀 20s 后在 500 倍显微镜下的图像

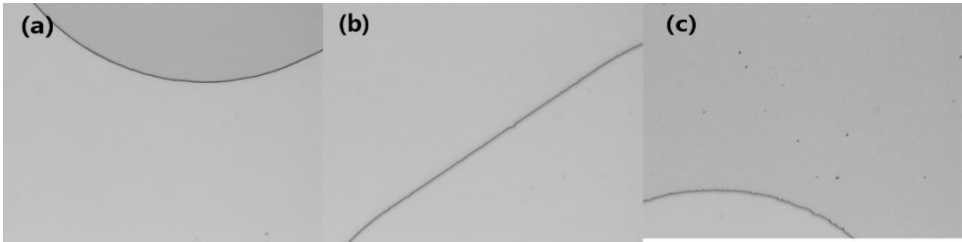


图 4(a)、(b)、(c)依次为实验片 1 (a) 、 (b) 、 (c) 刻蚀 60s 后再 500 倍显微镜下的图像

2.1 刻蚀功率对表面形貌的影响

除了刻蚀深度外，刻蚀过程中表面温度的变化可能影响副产物的挥发而影响表面形貌，本实验通过改

变 ICP 刻蚀功率来提高刻蚀 InP 时的表面温度。样品采用上述生长有 InGaAs 层的 InP 外延片（解理出三片样品，实验片 2(a)、实验片 2(b)、实验片 2(c)）和完全腐蚀掉 InGaAs 的 InP 外延片（解理出三片样品，实验片 3(a)、实验片 3(b)、实验片 3(c)）。除腔室压力、ICP 功率外，ICP 刻蚀的其他参数保持与实验 1.1 一致；实验片 2(a)和实验片 3(a)在 1000W、4mtorr 的条件下进行刻蚀，实验片 2(b)和实验片 3(b)在 1200W、6mtorr 的条件下进行刻蚀，实验片 2(c)和实验片 3(c)在 1500W、6mtorr 的条件下进行刻蚀。

根据之前刻蚀的速率，确定实验片 2(a)、(b)、(c)和实验片 3(a)、(b)、(c)的刻蚀时间为 50s，以保证能刻穿实验片上的 InGaAs 层。刻蚀结果如表 3 所示。在 Cl₂/Ar/CH₄ 的气体条件下，相对于 InP 来说 InGaAs 的 ICP 刻蚀速度较慢，实验片 2(a)、(b)、(c)是从 InGaAs 层开始刻蚀，所以相对于实验片 3(a)、(b)、(c)的刻蚀深度要小一些。

表 3 不同刻蚀条件下刻蚀的深度

	ICP功率(W)	腔室压力 (mTorr)	剩余InGaAs厚 度 (um)	50sICP的刻蚀 深度 (um)
实验片2(a)	1000	4	0.34	0.36
实验片2(b)	1200	6	0.34	0.43
实验片2(c)	1500	6	0.34	0.54
实验片3(a)	1000	4	0	0.76
实验片3(b)	1200	6	0	1.00
实验片3(c)	1500	6	0	1.12

我们对实验片 1(a)和实验片 2(a)的刻蚀表面进行对比。对比表 2 和表 3 的数据，按照 SiO₂ 掩膜 80nm/min 的速率，实验片 1(a)的 InP 刻蚀深度为 0.11um。相应的，实验片 2(a)的 InP 刻蚀深度为 0.10um，可以视为两者刻蚀的 InP 层的深度应该基本相等。但在显微镜下观察，实验片 2(a)要比实验片 1(a)的表面要光滑的多，也比刚刻蚀到界面处的实验片 1(b)的表面更光滑，与上个实验中继续刻蚀 60s 后的结果接近，如图 5 所示。两者刻蚀 InP 的深度相同，但刻蚀时间更长的实验片 2(a)使得 InP 在刻蚀时表面温度更高，利于生成的 InCl_x挥发，也就得到更为光滑的刻蚀表面。

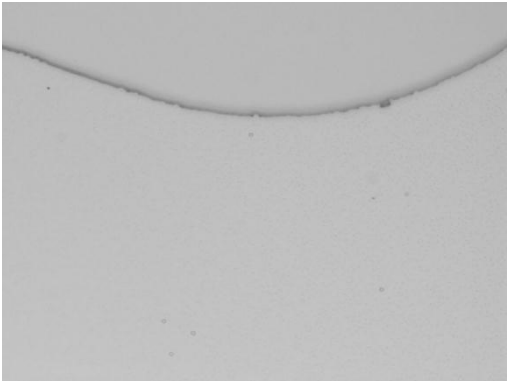


图 5 实验片 2（a）刻蚀 50s 后的显微镜图像

实验片 2(a)、2(b)、2(c)之间除了刻蚀深度依次递增以外，表面均表现出较为光滑的情况，与上个实验刻蚀 60s 后的结果类似，高倍显微镜下看不出明显的颗粒。刻蚀 InP 深度更大的实验片 3(a)、3(b)、3(c)之间的情况也与之类似，这也证明了 2.1 中所说的表面形貌并不与刻蚀深度直接相关。虽然提高 ICP 的功率也能提高刻蚀时 InP 的表面温度，但处于较长时间的刻蚀时，InCl_x挥发已经处于一个比较稳定的状态，ICP 功率的提升对表面的改善在此时并不明显。

2.2 制备APD器件并进行测试

随后利用改进后的 ICP 条件制备 APD 器件，控制每次 ICP 的时间和功率，保证刻蚀时表面都能处于较

高的温度，利于 InCl_x 的挥发。最后得到了表面光滑的刻蚀面，钝化、溅射金电极在室温下进行 I-V 测试，测试结果如图 6、图 7 所示。

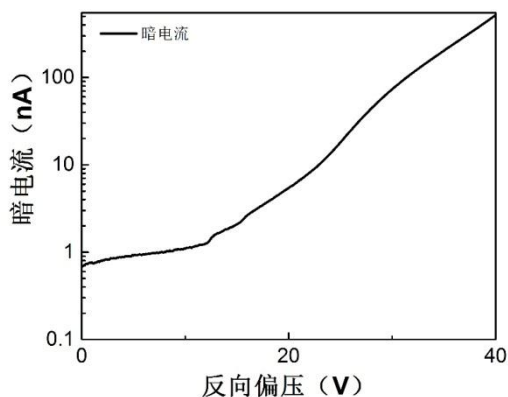


图 6 APD 器件无光条件下 I-V 特性

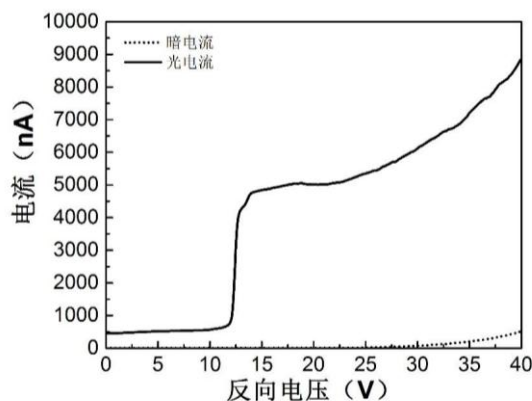


图 7 APD 器件有光、无光条件下 I-V 特性对比

从图 7 中可以看出 APD 器件的从 12V 左右开始进入雪崩区，光电流迅速增加。并且对比图 6 可以看出，从 0V 一直到进入雪崩区，暗电流始终保持在 10nA 以下，这也表明优化工艺后对暗电流的抑制效果还是很明显。另外，从图 7 中可以看出直至超出仪器电压测试范围，APD 器件也没有出现明显的击穿。这是因为 ICP 刻蚀时横向钻蚀很小，能够保证侧壁的陡直，后续的钝化工艺能够很好进行钝化保护。

3 结论

在 APD 器件的制备中，虽然湿法腐蚀速率稳定、表面损伤小，可以采用腐蚀停技术易于控制等优点；但是由于台面高度较大，湿法腐蚀会造成严重的横向钻蚀，在侧壁形成大量悬挂键和缺陷，导致击穿性能和漏电流特性下降。不仅如此，湿法腐蚀所造成的钻蚀，还会影响后续的钝化工艺，当钻蚀严重时，使用二氧化硅和氮化硅钝化很难保证侧壁完全覆盖，无法保证器件的击穿性能、暗电流特性以及可靠性。另外，湿法腐蚀到 InP/InGaAs 界面处后续的 ICP 刻蚀时间较短，InP 表面温度较低，使得 InCl_x 难挥发，刻蚀表面很粗糙，造成表面漏电增大。

实验过程中，气源为 $\text{Cl}_2/\text{CH}_4/\text{Ar}$ 、ICP 功率为 1000W、压力 4mTorr 条件下，对 InGaAs 的 ICP 刻蚀一直比较稳定；而在刻蚀 InP 时，如果器件刻蚀表面温度较低的话，难以保证有平整的表面形貌来降低表面漏电。所以，通过控制剩余 InGaAs 层的厚度，保证最后一次刻蚀到 InP 层的时间在 50s 以上，来确保刻蚀表面处于较高的温度，可以得到表面光滑的 InP 接触层，加之 ICP 刻蚀侧面无钻蚀的优势，能够保证后续钝化工艺正常进行。最后利用优化后的干法工艺最终制备出性能优良的 APD 器件。

REFERENCES

- [1] Jiang X, Itzler M A, Ben-Michael R, et al. InGaAsP-InP Avalanche Photodiodes for Single Photon Detection[J]. Selected Topics in Quantum Electronics IEEE Journal of, 2007, 13(4):895-905.
- [2] Ma C L F, Deen M J, Tarof L E. Device parameters extraction in separate absorption, grading, charge, and multiplication InP/InGaAs avalanche photodiodes[J]. Electron Devices IEEE Transactions on, 1995, 42(12):2070-2079.
- [3] Ferraro M S, Clark W R, Rabinovich W S, et al. InAlAs/InGaAs avalanche photodiode arrays for free space optical communication[J]. Applied Optics, 2015, 54.
- [4] Kleinow P, Rutz F, Aidam R, et al. Experimental investigation of the charge-layer doping level in InGaAs/InAlAs avalanche photodiodes[J]. Infrared Physics & Technology, 2015, 71:298-302.
- [5] Beck J D, Kinch M, Sun X. Update on linear mode photon counting with the HgCdTe linear mode avalanche photodiode[J].

Optical Engineering, 2014, 53(8):081906-081906.

- [6] Kang Y, Mages P, Pauchard A, et al. Dark current reduction in fused InGaAs/Si avalanche photodiode[C]// Lasers and Electro-Optics Society, 2001. LEOS 2001. The 14th Annual Meeting of the IEEE. IEEE, 2001:772 - 773.
- [7] Hao Guoqiang. Study on Physics and devices of InGaAs Infrared detectors[D]. Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Microsystems and Information Technolog),2006.
- [8] Klem J F, Kim J K, Cich M J, et al. Mesa-isolated InGaAs photodetectors with low dark current[J]. Applied Physics Letters, 2009, 95(3):031112-031112-3.
- [9] Ma Lina, Guo Xia, Shen Guangdi. Research Progress in Etching of Group-III Nitride Material[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2005, 26(4):274-279.
- [10] Zhou Xun, Tian Kun, Zhao Wenbo, et al. Effects of ICP Pressure on the Surface Damages of Etched AlGaIn[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2013(01).
- [11] Yang Jianrong. Physics and Technology of HgCdTe Materials [M]. National Defence Industry Press, 2012.
- [12] Forrest S R, Leheny R F, Nahory R E, et al. In_{0.53}Ga_{0.47}As photodiodes with dark current limited by generation - recombination and tunneling[J]. Applied Physics Letters, 1980, 37(3):322-325.
- [13] Pearton S J, Chakrabarti U K, Hobson W S, et al. Cl₂ and SiCl₄ Reactive Ion Etching of In - Based III-V Semiconductors[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1990, 137(10):3188-3202.

【作者简介】



¹ 夏伟(1989-), 男, 汉族, 硕士生, 主要从事 InP/InGaAs 红外探测器方面的研究。
Email:xiawei@emails.bjut.edu.cn

² 邓军(1969-), 男, 博士, 副教授, 主要从事多量子阱红外探测器、多种半导体激光器及 MOCVD 外延制备的研究。
Email:dengsu@bjut.edu.cn