

高性能 976 nm 宽条半导体激光芯片

胡海^{1,2,3**}, 仇伯仓^{1,2,3}, 何晋国^{1,2,3}, 汪卫敏², 赵楚中², 刘文斌², 邝朗醒², 白雪^{2*}

¹深圳清华大学研究院, 广东 深圳 518057;

²深圳瑞波光电子有限公司, 广东 深圳 518055;

³广东省光机电一体化重点实验室, 广东 深圳 518057

摘要 设计并制作了波长为 976 nm 的宽条大功率半导体激光芯片。采用非对称宽波导外延结构设计及金属有机化学气相外延技术生长了低损耗、高效率的外延材料。制备了 190 μm 发光区宽度、4 mm 腔长、976 nm 波长的半导体激光芯片,并将其封装为 COS 器件。测试结果表明:封装器件在室温下的阈值电流为 1.05 A,斜率效率为 1.12 W/A,最高电光转换效率可达到 68.5%;在 40 $^{\circ}\text{C}$ 、19.5 W 功率输出时的电光转换效率可以达到 60%;9 个器件在 40 $^{\circ}\text{C}$ 和 15 A 电流下老化 4740 h 后,无一失效,而且老化前后的功率-电流曲线和光谱没有变化,证明该激光芯片具极高的稳定性和可靠性。

关键词 激光器; 半导体激光器; 电光转换效率; 亮度; 腔面灾变功率

中图分类号 TN248.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0801006

976 nm Wide-Stripe Semiconductor Laser with High-Performance

Hu Hai^{1,2,3**}, Qiu Bocang^{1,2,3}, He Jinguo^{1,2,3}, Wang Weimin²,
Zhao Chuzhong², Liu Wenbin², Kuang Langxing², Bai Xue^{2*}

¹Research Institute of Tsinghua University in Shenzhen, Shenzhen, Guangdong 518057, China;

²Shenzhen Raybow Optoelectronics Co. Ltd., Shenzhen, Guangdong 518055, China;

³Guangdong Provincial Key Laboratory of Optomechatronics Integration, Shenzhen, Guangdong 518057, China

Abstract Semiconductor laser chips with 976 nm wavelength, broad stripe and high power are designed and realized. The epitaxial structure design of an asymmetric and large waveguide, and metal organic chemical vapor phase epitaxy technology are used to grow epitaxial materials with low loss and high conversion efficiency. The semiconductor laser chips with 190 μm stripe width, 4 mm length and 976 nm wavelength are packaged and packaged as chip-on-submount. The test results show that the threshold current of package-device at room temperature is 1.05 A, slope efficiency is 1.12 W/A, and the maximum conversion efficiency is 68.5%. Even at the elevated temperature of 40 $^{\circ}\text{C}$ and the output power of 19.5 W, the conversion efficiency reaches 60%. Nine devices are aging-tested at 40 $^{\circ}\text{C}$ and 15 A for 4740 hours, and no failure occurs. There are no changes in power-current curves and spectra before and after aging-test, which proves high stability and reliability of the laser chips.

Key words lasers; semiconductor laser; photoelectric conversion efficiency; brightness; catastrophic optical damage power

OCIS codes 140.5960; 250.5960

1 引 言

以掺稀土元素镱(Yb)的光纤激光器为核心部件的激光工业加工设备已经大规模应用于各种工业

制造过程中。虽然 Yb 的吸收谱极为宽广(为 900~1000 nm),但其在 976 nm 处的吸收强度是 915 nm 处吸收强度的 4 倍^[1]。高的吸收强度可以使有源光纤的长度大幅缩短,从而降低有源光纤的非线性效

收稿日期: 2018-02-08; 修回日期: 2018-03-12; 录用日期: 2018-03-18

基金项目: 国家 863 计划(2015AA016901)、广东省引进创新科研团队项目(2011D040)、深圳市孔雀计划(KQTD201106)、深圳市技术攻关项目(重 20160165)

* E-mail: baixue@raybowlaser.com (通信作者); ** E-mail: huhai@raybowlaser.com

应,有利于进一步提高光纤激光器的功率。Gilly等^[2]对最高效率达到65%、输出功率为10 W、发光区域宽度为90 μm的976 nm半导体激光芯片进行了研究。此外,半导体激光抽运源占光纤激光器总成本的比例最大,工业界迫切需要通过增加单器件的功率来降低半导体激光抽运源的成本。由于976 nm半导体激光芯片的可靠性受限于腔面灾变阈值功率密度,通过增加发光区宽度来增加输出功率是提高单芯片功率、降低抽运源模块成本的有效办法。因此将发光区宽度约为190 μm的半导体激光芯片耦合到200 μm光纤,为低成本抽运源模块提供了一个较佳的解决方案^[3]。针对高功率以及高光电转换效率这一要求,本课题组系统地优化了发光区宽度为190 μm、波长为976 nm的高功率器件的材料结构,包括波导结构、掺杂分布、器件腔长、腔面反射率等;采用金属有机化学气相外延技术生长了低损耗、高效率的外延材料,制备了发光区域宽度为190 μm、腔长为4 mm的芯片,并将其封装为COS(Chip-on-submount,封装到热沉上的芯片)器件。

2 外延结构与器件结构设计

对于976 nm光波导结构,有两种思路截然不同的设计:其一为传统的单模设计^[4],其特点是在材料生长方向上为小光腔结构,波导总厚度一般不超过0.5 μm,在生长方向上,波导只支持基模。该设计器件的阈值电流低,缺点是内损耗高、效率低、腔面的功率密度高,不适合高输出功率的器件。其二为大光腔结构(LOC)^[5-7],波导层的总厚度从1 μm左右到数微米。LOC结构的优点是光损耗可以被设计得非常低,因为光场和材料掺杂区域的重叠很小,如此一来,自由载流子吸收以及价带间的吸收可以被大幅降低。国内多个单位开展了基于LOC结构的研究,并取得了一定进展^[8-10]。

2.1 双非对称大光腔结构设计

由于器件的可靠性与腔面功率密度有关,为了提高器件工作的可靠性,本课题组采用了低功率密度波导设计,该设计与文献^[5, 11-12]的设计方法类似。另外,出于芯片散热的考虑,采用长腔结构设计,此结构使得低功率密度(意味着低量子阱限制因子)的LOC设计成为可能。同时进一步采用波导层和包层均为非对称的LOC结构,设计的思想在于尽可能减小光场与P型区域的重叠,原因在于:空穴对光的吸收截面远大于电子对光的吸收截面,减小光场与P型区域的重叠可有效降低腔内损

耗;空穴在Al_xGaAs(当x<0.45)材料中的迁移率远小于电子在该材料中的迁移率,减小光场与P型区域的重叠使得优化掺杂分布成为可能,从而最大限度地降低芯片串联电阻。

976 nm外延主要材料的结构如表1所示。量子阱为7 nm的InGaAs,势垒为AlGaAs材料,波导层的总厚度为1.6 μm。

表1 976 nm外延主要材料的结构
Table 1 Structure of 976 nm epitaxial material

Material composition	Thickness /μm	Description	Doping type
GaAs	0.200	Ohmic contact	P++
Al _{0.31} GaAs	1.200	Upper cladding	P
Al _{0.21} GaAs	0.500	Upper waveguide	I
In _{0.16} GaAs	0.007	Quantum well	I
Al _{0.21} GaAs	0.700	Lower waveguide	I
Al _{0.21} GaAs	0.400	Lower waveguide	N
Al _{0.27} GaAs	1.000	Lower cladding	N

图1为设计的双非对称型波导折射率曲线,以及根据该折射率曲线计算的近场分布,在计算时未考虑电流、载流子浓度和热效应对折射率的影响。由图1可以看出:量子阱在波导中的位置更靠近P型区域一边;P型包层材料的折射率要低于N型包层材料的折射率。由于上述双非对称特性,在N型一侧(量子阱右侧)的模场占整体场能量的71%,而在P型一侧的模场只占29%。根据图2所示的远场分布可知,光束发散角的半峰全宽(FWHM)值为26°。

掺杂对器件效率的影响十分显著,因为掺杂不但影响芯片的串联电阻,而且影响激光谐振腔的光损耗。计算表明,对于采用大光腔的976 nm高功率激光结构,外延层掺杂引起的光损耗α可以减小到0.2 cm⁻¹以下,而器件的电阻率可以降低到6.5×10⁻⁵ Ω/cm²。

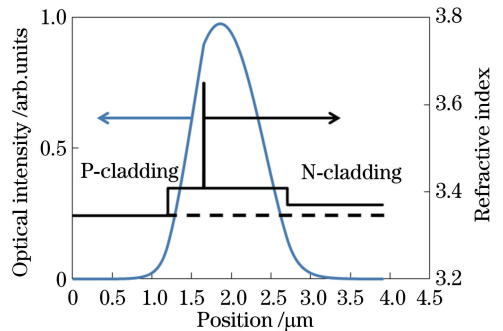


图1 双非对称结构的波导结构(黑线)以及对应的模场分布(蓝线)

Fig. 1 Double-asymmetric waveguide (black line) and simulated intensity distribution (blue line)

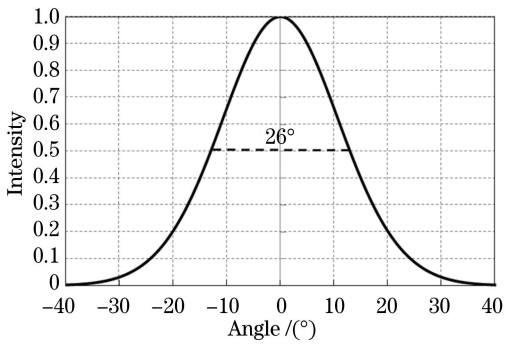


图 2 远场计算结果

Fig. 2 Calculation results of far-field

2.2 器件腔长设计与镀膜优化

高功率激光芯片在运行时会产生大量的热,所以器件的实际结温比环境温度高出许多。对于 976 nm 单管模块来说,芯片先以倒装焊的形式焊接在厚为 350 μm 的 AlN 陶瓷热沉上(称为 COS),随

后 COS 被进一步焊接在通用的碟形封装盒内。针对上述封装形式,本课题组采用三维数值分析方法分析了典型的用于 976 nm 光纤激光抽运模块封装的热场分布,计算出整个封装模块的热阻。器件的电流注入区宽度固定为 190 μm ,以便与芯径为 200 μm 的多模光纤耦合。器件的热阻计算完毕后,本课题组采用自主开发的激光分析程序计算了不同腔长的器件的性能。图 3 为计算出的电光转换效率(WPE)以及工作电流(对于 15 W 的输出功率)与腔长 L 、增透膜(AR)反射率之间的关系。很显然,当腔长大于 4 mm 时,器件的效率几乎达到 68%,说明更长的腔长对效率稍有益处。效率与腔长之间的依赖关系本质上是由几个不同的物理因素决定的,即包括芯片在内的封装模块的热阻、电阻以及器件外量子效率均随腔长增加而减小。综合考虑器件效率与晶片产出率,本课题组选择了 4 mm 的腔长。

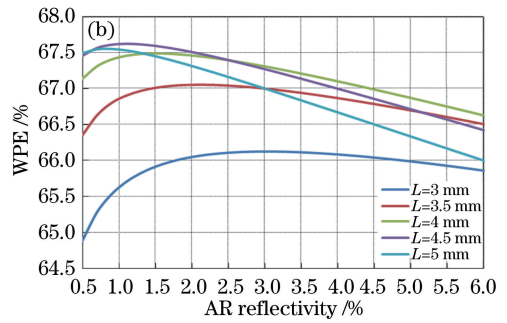
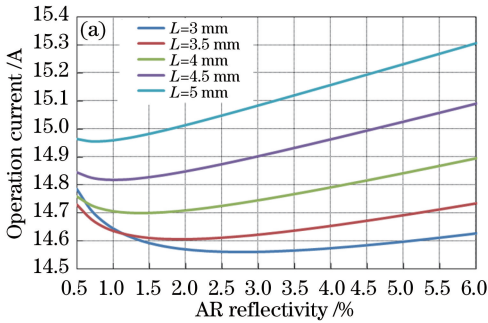


图 3 (a)工作电流、(b)电光转换效率与腔长、AR 膜反射率的关系

Fig. 3 Relationship between (a) operation current or (b) WPE and cavity length and AR-reflectivity

3 器件制作和测试结果

外延材料用金属有机气相沉积(MOCVD)技术生长而成。本课题组制作了腔长为 4 mm、发光区宽度为 190 μm 、芯片宽度为 500 μm 、工作功率为 15 W 的半导体激光芯片。相对于常规腔长为 4.8 mm、发光区宽度为 95 μm 、芯片宽度为 500 μm 、工作功率为 10 W 的半导体激光芯片,本课题组制作的芯片的输出功率提高了 50%,芯片面积减小了 17%,相当于每瓦功率的材料成本降低了 45%。芯片工艺以光学曝光为起点,随后经过电接触窗口、P 面金属化、晶片减薄、N 面金属化、快速退火以及腔面镀膜等工序,前后腔面膜的反射率分别为 98% 和 2.5%。为保证芯片的可靠性,本课题组采用了先进的腔面解理钝化工艺,该技术目前正在申请专利。为了使芯片能够在高电流下以连续波的形式工作,将芯片以 P 面朝下的

方式焊接在双面覆铜的 AlN 陶瓷热沉上(AlN 陶瓷厚度为 350 μm ,上下铜层厚度为 70 μm ,焊料为预镀在热沉上的 AuSn),制作成为 COS,并对该类器件进行全面的表征评估。

图 4 为在 20 $^{\circ}\text{C}$ 和 40 $^{\circ}\text{C}$ 下以持续电流方式(CW)测得的光-电流和效率-电流特性曲线。COS 在 20 $^{\circ}\text{C}$ 环境温度下测试时,阈值电流为 1.05 A,斜率效率为 1.12 W/A,电光转换效率最高值为 68.5%;电流为 20 A 时的输出功率为 21.3 W,对应的电光转换效率为 65%;达到 15 W 工作功率时则需要的电流为 14.1 A,对应的电光转换效率为 67%,符合设计要求。COS 在 40 $^{\circ}\text{C}$ 环境温度下测试时,阈值电流为 1.2 A,斜率效率为 1.04 W/A,电光转换效率最高值为 65%;电流为 20 A 时的输出功率为 19.5 W,对应的电光转换效率为 60%;达到 15 W 工作功率时需要的电流为 15.1 A,对应的电光转换效率为 63%。

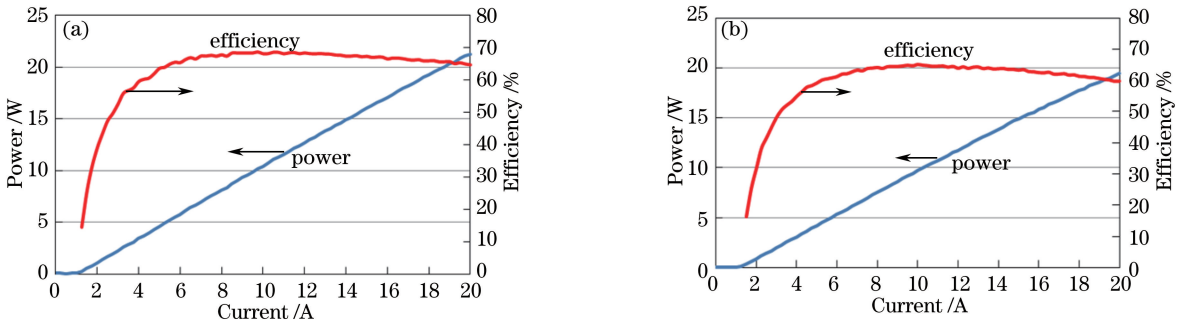


图 4 以持续电流方式测得的功率-电流和效率-电流特性曲线。(a) 20 °C ;(b) 40 °C

Fig. 4 Power-current curves and efficiency-current curves obtained by CW. (a) 20 °C ;(b) 40 °C

该器件具备良好的远场特性。测得的快轴方向发散角的 FWHM 为 25°,与模拟的 FWHM 值 26°相符合;涵盖 95%功率的全角测量值为 41°;快轴方向的分发散角几乎不随电流的变化而变化。因为热透镜和载流子空间烧孔、载流子在发光区域边缘堆积^[13]等效应的影响,室温下测得的慢轴发散角(涵盖 95%功率)随电流增加而出现展宽(如图 5 所示);电流分别为 3,15,18 A 时的慢轴发散角分别为 7°、9.5°和 10.5°,处于类似器件的正常范围;对应的光束质量因子(BPP)参数分别为 5.8,7.9,8.7 mm·mrad,对应的功率分别为 2.2,16,19.3 W。

1 ms 脉冲宽度、10 ms 脉冲周期的准连续波形(QCW)电流(0~50 A)测试老化前和老化 4740 h 后 COS 的 COD 功率。由图 7(a)可以看出,在电源可提供的最大电流 50 A 下,没有观察到 COD 发生,对应的 QCW 峰值功率大于 41 W。图 7(a)的结果证明腔面解离钝化和镀膜可以为该芯片提供远超过正常使用功率的 COD 功率,而且老化前后 COS 的功率-电流曲线几乎完全一致。图 7(b)给出了 QCW 电流为 20 A 时的光谱曲线,表明器件老化前后的光谱特性无明显变化,器件的性能和可靠性达到条宽扩展芯片的国际先进水平^[14]。

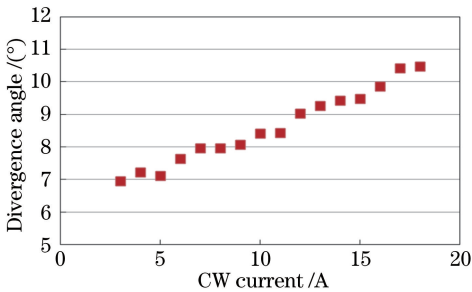


图 5 慢轴发散角(95%功率)随电流的变化

Fig. 5 Variation of slow-axis divergence angle (95% power) with CW current

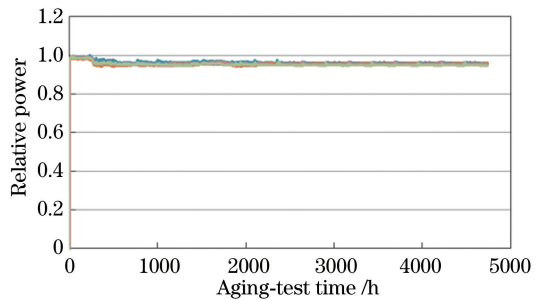


图 6 9 个器件在 40 °C 和 15 A 连续电流下老化的功率-时间曲线

Fig. 6 Power-time curves of nine devices in aging-test under the conditions of 40 °C and continuous current of 15 A

本课题组对器件的可靠性进行了评估。9 个 COS 在 40 °C、连续电流为 15 A 下的寿命测试时间已经累积到 4740 h(如图 6 所示)。图 6 的老化功率曲线在 276 h 附近有个幅度约 5%的台阶,该台阶对 9 个老化器件发生的时间相同,原因是老化系统中在线测量功率的积分球的位置在该时刻发生了变化,导致采集的光功率信号减小。除了这个台阶以及功率因为老化设备温度扰动而导致的少许变化外,9 个 COS 的功率在 4740 h 的老化过程中保持稳定,无一失效,证明该类型芯片具有良好的可靠性,目前老化实验仍在继续。为评估老化前和老化后 COS 的光学灾变(COD)功率,本课题组采用

4 结 论

本课题组制作了腔长为 4 mm、发光区宽度为 190 μm、芯片宽度为 500 μm 的半导体激光芯片,经过 4740 h 老化后,9 个器件无一失效,老化前后的 QCW COD 功率仍然大于 41 W(受限于测试设备的最大电流)。该芯片封装成的 COS 的最高电光转换效率接近 69%,在 15 W 的工作功率下电光转换效率达到 67%,并具备良好的远场特性,为 200 μm 直径的光纤耦合泵源模块提供了一种低成本、高性能、高可靠性器件。

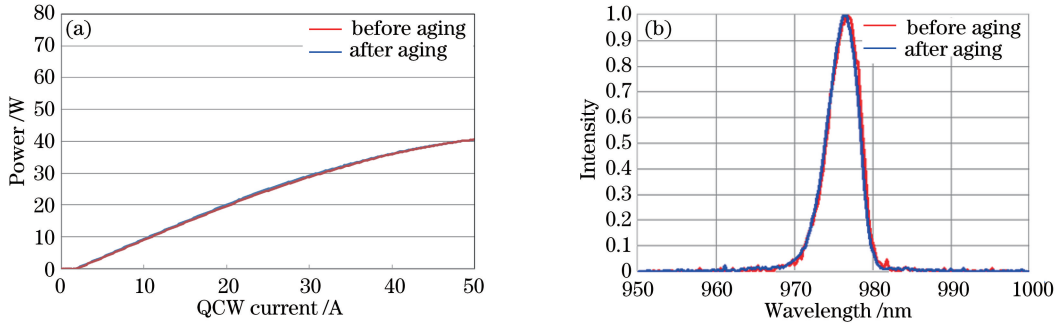


图 7 (a) 30 °C 下 COS 老化前和老化 4740 h 后的功率-电流曲线；
(b) COS 老化前和老化 4740 h 后在 20 A QCW 电流下的光谱曲线

Fig. 7 (a) Power-QCW current curves of COS before and after 4740 hour aging-test at 30 °C ;
(b) optical spectral curves of COS before and after 4740 hour aging-test at 20 A QCW current)

参 考 文 献

- [1] Harder C. Pump sources and related devices for high-power fiber laser systems[C]. *Optical Amplifiers and Their Applications/Coherent Optical Technologies and Applications*, Whistler, 2016: OSuA4.
- [2] Gilly J, Friedmann P, Kissel H, *et al.* 5 mm long broad-area lasers at 976 nm with 65% wall-plug efficiency[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7198: 71980B.
- [3] II-VI Laser Enterprise. 18 W 9xxnm 190 μm high power single emitter laser diode on submount[EB/OL]. [2018-02-15] http://www.laserenterprise.com/resources/pdf/D00xxx-PB_SES18-9xx-01_Datasheet_Iss01.pdf.
- [4] Qiu B C, McDougall S D, Liu X F, *et al.* Design and fabrication of low beam divergence and high kink-free power lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2005, 41(9): 1124-1130.
- [5] Lockwood H F, Kressel H, Sommers H S, *et al.* An efficient large optical cavity injection laser[J]. *Applied Physics Letters*, 1970, 17(11): 499-502.
- [6] Petrescu-Prahova I B, Modak P, Goutain E, *et al.* High d/gamma values in diode laser structures for very high power [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7198: 71981I.
- [7] Crump P, Blume G, Paschke K, *et al.* 20 W continuous wave reliable operation of 980 nm broad-area single emitter diode lasers with an aperture of 96 μm[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7198: 719814.
- [8] Liu M H, Cui B F, He X, *et al.* Study of high power semiconductor laser with low threshold current [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43 (5): 0502001.
- 刘梦涵, 崔碧峰, 何新, 等. 大功率低阈值半导体激光器研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(5): 0502001.
- [9] Wang Z F, Li T, Yang G W, *et al.* Development of 808 nm quasi-continuous wave laser diode bar with 600 W output power[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(6): 0601004.
- 王贞福, 李特, 杨国文, 等. 808 nm 准连续 600 W 高功率半导体激光芯片研制[J]. *中国激光*, 2017, 44(6): 0601004.
- [10] Li T, Hao E J, Li Z J, *et al.* Optimization of waveguide structure for high power 1060 nm diode laser[J]. *Journal of Infrared & Millimeter Waves*, 2012, 31(3): 226-230.
- [11] Moshe L, Yoram K, Noam R, *et al.* Development of asymmetric epitaxial structures for 65% efficiency laser diodes in the 9xx nm range[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7583: 75830J1.
- [12] Kaifuchi Y, Yamagata Y, Nogawa R, *et al.* Ultimate high power operation of 9xx-nm single emitter broad stripe laser diodes[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10086: 100860D.
- [13] Piprek J, Simon Z. On the importance of non-thermal far-field blooming in broad-area high-power laser diodes[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102 (22): 221110.
- [14] Yamagata Y, Yamada Y, Kaifuchi Y, *et al.* Performance and reliability of high power, high brightness 8xx-9xx nm semiconductor laser diodes [C]. *2015 IEEE High Power Diode Lasers and Systems Conference*, 2015: 15872936.