

太赫兹半导体器件与应用*

——纪念刘惠春教授

曹俊诚^{1,†} 雷啸霖² 胡青³ 张潮⁴ 张希成⁵

(1 中国科学院上海微系统与信息技术研究所 中国科学院太赫兹固态技术重点实验室 上海 200050)

(2 上海交通大学物理与天文系 上海 200030)

(3 美国麻省理工学院电子工程与计算机科学系和电子学研究室 剑桥 02139)

(4 澳大利亚伍伦贡大学工程物理学院 伍伦贡 2552)

(5 美国罗切斯特大学光学研究所 纽约 14627)

Terahertz semiconductor devices and their applications

——In memory of Hui-Chun Liu

CAO Jun-Cheng^{1,†} LEI Xiao-Lin² HU Qing³ ZHANG Chao⁴ ZHANG Xi-Cheng⁵

(1 Key Laboratory of Terahertz Solid-State Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

(2 Department of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

(3 Department of Electrical Engineering and Computer Science and Research Laboratory of Electronics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts 02139, USA)

(4 School of Engineering Physics, University of Wollongong, Wollongong, New South Wales 2552, Australia)

(5 Institute of Optics, University of Rochester, Rochester, New York 14627, USA)

摘 要 文章是以作者和刘惠春教授多年合作的研究工作为基础写成的, 主要内容为太赫兹(THz)半导体器件及其通信和成像应用, 以此深切缅怀刘惠春教授。近十年来, THz科学与技术已取得了长足进步, 它在物理学、材料科学、生命科学、天文学、信息技术和国防安全等多个领域的应用也已初现端倪。在这些应用中, 半导体THz器件的发展起着举足轻重的作用。文章着重介绍了作者近年来在半导体THz器件与应用方面的研究进展, 主要包括基于负有效质量的电子学THz振荡器、飞秒激光泵浦半导体THz辐射源、基于量子阱子带间跃迁的THz量子级联激光器, 以及基于这些器件的THz无线通信和成像应用研究。此外, 文章还对未来THz技术的发展进行了简要的探讨。

关键词 太赫兹, 半导体器件, 太赫兹辐射源, 太赫兹探测器, 太赫兹通信, 太赫兹成像

Abstract The authors dedicate this paper to the memory of Hui-Chun Liu—the renowned physicist and world leader in the area of intersubband transitions in quantum wells and dots. We review the research on terahertz (THz) semiconductors and their applications which was carried out by the authors in collaboration with H. C. Liu. The past decade has seen a revolution in THz science and technology, and the potential of THz radiation for applications in a vast range of disciplines has been demonstrated. We report the latest progress in the development and application of THz semiconductor devices, including oscillators based on negative effective mass, sources based on semiconductors pumped by femtosecond lasers, quantum cascade lasers, quantum well photodetectors, and communication and imaging applications, all in the THz regime.

Keywords terahertz (THz), semiconductor devices, THz sources, THz detectors, THz communication, THz imaging

† email: jccao@mail.sim.ac.cn DOI: 10.7693/wl20140801

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2014CB339803)、国家高技术研究发展计划(批准号: 2011AA010205)、国家自然科学基金(批准号: 61321492, 61131006)资助项目; 国家重大科学仪器设备开发专项(批准号: 2011YQ150021), 02国家科技重大专项(批准号: 2011ZX02707); 中国科学院重要方向项目(批准号: YYYJ-1123-1), 中国科学院创新团队国际合作伙伴计划“高迁移率材料工程”创新团队资助项目

1 引言

推动太赫兹(THz)科学与技术^[1-23]进步的关键在于THz源和探测器的发展。由于半导体器件具有体积小、易集成、成本相对低廉等优点,因此无论是在科学研究方面还是在未来大规模应用方面,半导体THz源和探测

器的研究和开发都具有非常重要的意义。THz频段介于传统的电子学和光子学频带之间,THz半导体器件的研究也主要是从这两个方向开展的。半导体负有效质量的出现会引起场畴的形成并导致电流振荡,基于这一原理可以实现THz频率的振荡和研制THz辐射源。在飞秒激光的照射下,许多半导体材料也可以辐射出THz脉冲,这种辐射源称为飞秒激光泵浦的半导体THz辐射源。目前,THz量子级联激光器(QCL)和THz量子阱探测器(QWP)是太赫兹半导体器件研究的重点方向。THz QCL和THz QWP的研制成功极大地推进了THz研究的进展。这两种器件的有源区均为周期性多量子阱结构,器件的工作是通过电子在量子阱子带间的跃迁进而产生或吸收THz光子实现的。该类器件具有响应速度快的优点,非常适合于宽带无线通信、高清晰度实时成像等高速THz应用系统。

本文介绍了基于负有效质量的电子学THz振荡器、飞秒激光泵浦的半导体THz辐射源、基于量子阱子带间跃迁的THz QCL和THz QWP,以及基于这些器件的THz无线通信和成像应用研究。

本文是以作者和刘惠春教授多年合作的研究工作为基础写成的,谨以此文深切缅怀刘惠春教授。

2 THz 半导体辐射源

2.1 负有效质量 THz 振荡器

大量实验和理论研究表明,自旋轨道相互作用

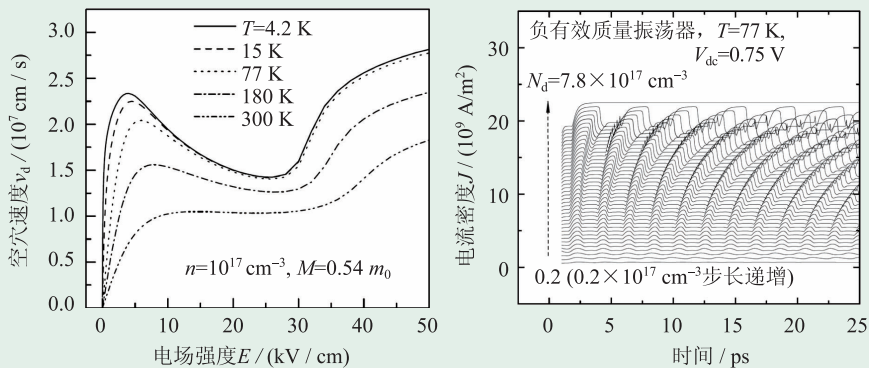


图1 (a)负有效质量半导体的空穴速度 v_d 与电场 E 的关系;(b) p^+pp^+ 二极管负有效质量振荡器中电流密度 J 随时间的变化,其振荡频率在THz区域内^[23]

和量子阱势对称性的破坏使得量子阱价带的子带结构非常复杂,其特性之一是,在最低空穴子带的能量色散关系中,存在一个负有效质量区域,即,对于空穴能量 $\varepsilon = \varepsilon(k)$,其中 $k = |\mathbf{k}|$, $\mathbf{k}$ 表示波矢,在某个 $\mathbf{k}$ 的区域中, $d^2\varepsilon/dk^2$ 是负值,这说明在该区域中,空穴的有效质量是负值,增加电场强度反而会降低空穴的漂移速度。载流子的能量色散关系决定了载流子的输运特性,特别是具有负有效质量的能量色散关系会引起许多有趣的现象,比如电流自振荡和复杂的非线性动力学现象等^[22]。基于负有效质量空穴色散关系可以设计THz振荡器^[23]。

曹俊诚、雷啸霖和刘惠春采用非抛物平衡方程方法和瞬态漂移扩散模型,研究了p-GaAs量子阱空穴的输运特性^[23]。在平衡方程计算中,考虑了空穴—杂质散射、空穴—声学声子散射、空穴—极性光学声子散射和空穴—非极性光学声子相互作用,计算得到的负有效质量半导体的空穴速度与电场的关系具有“N”形结构,即具有一个负微分速度区域,如图1(a)所示。在 $T = 77$ K时,速度与电场关系的解析拟合表达式为

$$v_d(E) = 1.31350E \times \left[1 - 0.99616 \frac{E^2 + 5.85828}{E^2 + 1.00716E + 15.30504} + 0.01087 \arctan(0.40437E - 12.78973) \right].$$

将上式代入瞬态漂移扩散模型的方程中,用以研究 p^+pp^+ 二极管空穴的时空特性。图1(b)中的计算结果表明,在一定的掺杂浓度范围内,直流偏置

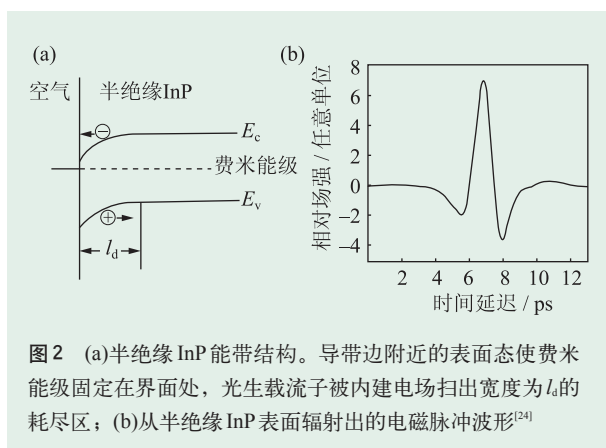


图2 (a)半绝缘 InP 能带结构。导带边附近的表面态使费米能级固定在界面处, 光生载流子被内建电场扫出宽度为 l_d 的耗尽区; (b)从半绝缘 InP 表面辐射出的电磁脉冲波形^[24]

下的 p^+pp^+ 二极管中出现了与电场畴相关的电流自振荡, 其振荡频率在 THz 区域内。

2.2 飞秒激光泵浦的半导体 THz 辐射源

张希成的研究发现, 在飞秒激光的照射下, 许多半导体材料也可以辐射出 THz 脉冲。这种辐射源称为飞秒激光泵浦半导体 THz 辐射源^[24]。在诸多 III—V 族和 II—VI 族半导体材料中, 半绝缘的 InP 具有较高的辐射效率。图 2(a)给出了半绝缘 InP 表面(InP 和空气)附近的能带图。半绝缘 InP 的表面态在导带边附近, 由于费米能级被固定在界面处, 导带和价带都出现了向下弯曲, 在半绝缘 InP 表面的附近宽度为 l_d 的区域形成了耗尽区。当超快激光脉冲照射在半绝缘 InP 时, 如果光子能量大于半导体禁带宽度, 那么光子就会被吸收, 并产生电子—空穴对。在内建电场作用下, 电子往半导体表面运动, 而空穴流向了材料内部, 形成瞬态光电流及偶极子层。该瞬态光电流的上升沿与飞秒激光脉冲宽度相当, 而衰减时间为载流子在耗尽区中的渡越时间。该瞬态光电流会产生电磁辐射, 频率在 1 THz 以上, 并且与载流子的寿命无关。实验中的飞秒激光脉冲能量为 0.2 nJ, 重复频率为 100 MHz, 脉宽为 70 fs, 中心波长为 620 nm。图 2(b)给出了半绝缘 InP 表面辐射出的电磁脉冲波形图, 脉冲宽度约为 2.4 ps, 辐射强度与泵浦光强(0.2—10 mW)成正比。

这种方式产生的 THz 脉冲可从半导体表面辐射出来, 也可向半导体内部传输, 这两部分都是

TM 模并且具有相反的符号, 从表面辐射出来的 THz 脉冲与脉冲激光的反射方向一致。改变激光脉冲的入射方向, 辐射场振幅会发生变化。如果激光脉冲正入射(即沿半导体表面法线方向入射), THz 脉冲辐射场强度为零, 而当入射脉冲方向从法线一边转到另一边时, 辐射场的符号会发生变化。当激光脉冲沿布儒斯特角入射时, THz 脉冲辐射场强度达到最大值。辐射场的强度与激光脉冲的功率、载流子的迁移率、内建电场强度以及光生载流子的浓度有关。相比于半导体光电导天线, 使用这种半导体材料作为 THz 脉冲的激发载体时不需要制备天线, 也不需要外加偏压, 是一种产生电磁辐射脉冲的便利途径。

2.3 THz 量子级联激光器

QCL 是一类非常重要的半导体激光辐射源。1994 年, 世界上第一个中红外 QCL 诞生, 2002 年, 第一个 THz QCL^[6] 研制成功。之后, 胡青课题组在 THz QCL 的研究方面取得了很多突破性的进展。目前, THz QCL 的性能已经有了长足的进步, 其激射波长范围覆盖了 0.68—5.0 THz 范围^[6—10, 25—30], 关于 THz QCL 的最新研究进展可参考最近的一些综述文献^[7, 31]。

2005 年, 刘惠春课题组、曹俊诚和胡青合作研制了共振声子 THz QCL^[32], 其有源区的周期性单元为四阱结构, 参数为 $54/78/24/64/38/153/35/88$ Å, 黑体表示势垒, 下划线代表掺杂层。实验测得该 THz QCL 的激射频率为 2.9 THz, 脉冲模式最高工作温度为 125 K, 最大输出功率为 10 mW, 图 3(a)给出了激射光谱和不同温度下的激射强度随电流密度的变化曲线。他们还研究了掺杂浓度对器件性能的影响。结果表明, 阈值电流密度随掺杂浓度的提高而增加, 随激光器腔长的增加而减小, 存在一个最佳的掺杂浓度, 它使器件具有最高的激射温度, 如图 3(b)所示。

2012 年, 刘惠春和胡青课题组合作研制的 THz QCL 创造了最高的工作温度记录, 脉冲模式

下达到 199.5 K^[10]。该器件基于三阱共振声子结构(如图4所示),采用简化的密度矩阵模型模拟与实验尝试相结合的方法,选择了隧穿势垒的宽度,从而优化了该结构中激射能级间跃迁的振荡强度,最优振荡强度达到0.58。该器件在8 K时阈值电流密度为1 kA/cm²,峰值功率为38 mW。图5中给出了激射光谱,当偏压增大时,激射频率从2.6 THz开始蓝移,这种随偏压变化的蓝移与子带间跃迁的Stark效应有关。在最大工作温度199.5 K下,器件工作频率为3.22 THz,该工作温度相当于 $1.28 \hbar\omega/k_B$ 。

2009年,胡青课题组开发出一一种可调的THz线激光器^[8]。激光器的调谐一般通过调节纵向波矢 k_z 、横向波矢 $k_\perp$ 或者材料介电函数 ε 中的三者之一来实现。受限于材料和结构特点,调节 k_z 和 ε 对THz QCL效果均不理想。

因此,该THz线激光器通过安放一个可移动的活塞来控制横向模式在激光腔外的分布,实现了对 $k_\perp$ 的调节,进而实现了对THz QCL的调谐。THz QCL的中心工作频率为3.83 THz,当调节Si活塞块与激光器的距离时,调谐范围达到137 GHz,单模工作,无跳模。在提高器件工作温度方面,胡青课题组于2010年研制出一种基于四阱散射辅助注入结构的THz QCL^[9],实现了工作温度的突破。在器件激射频率为1.8 THz时,最大工作温度可达163 K,相当于1.9倍的 $\hbar\omega/k_B$ 。根据这一研究结果,THz QCL在不久的将来有望实现室温工作。

自2005年以来,曹俊诚课题组在理论和实验方面对THz QCL展开了一系列的研究。近来,基于束缚态向连续态跃迁的有源区结构,研制了半绝缘等离子体波导太赫兹量子级联激光器^[33]。器

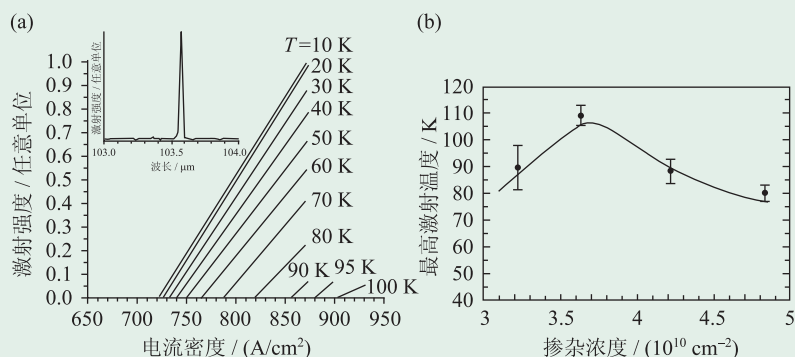


图3 (a)THz QCL的激射强度随电流密度的变化曲线(插图为该器件的激射光谱); (b)掺杂浓度与器件最高激射温度的关系^[32]

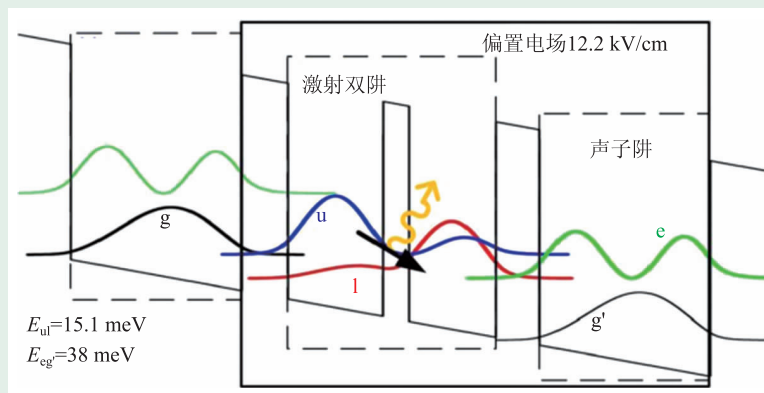


图4 三阱共振声子结构的THz QCL示意图(其中u为上激射能级,l为下激射能级,g和g'为声子阱基态,e为声子阱激发态)^[10]

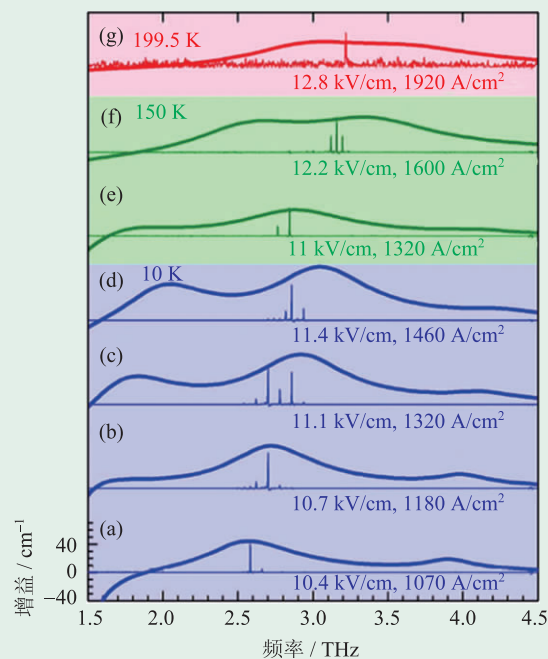
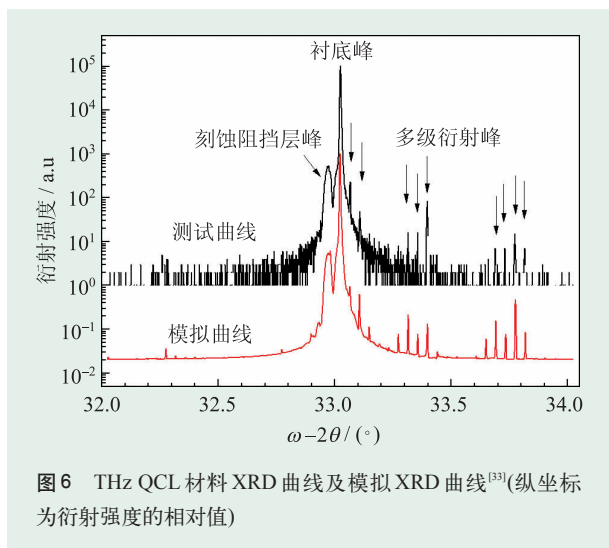


图5 不同电流密度情况下的激射光谱(工作温度:(a)—(d)为10 K;(e)—(f)为150 K;(g)为199.5 K。图中光滑曲线为蒙特卡罗模拟得到的增益谱)^[10]



件激射频率约为2.95 THz。在脉冲模式下,最高工作温度为67 K。在连续波模式下,阈值电流密度最低为230 A/cm²,最大光输出功率为1.2 mW。该器件使用的材料为GaAs/AlGaAs,它由气态源分子束外延设备在半绝缘GaAs(100)衬底上外延生长而成。器件有源区的周期性结构参数为3.7/13.7/0.6/8.8/0.6/15.5/1.5/12.5/1.8/12.0/2.0/11.8/2.0/11.2/2.7/11.1/3.4/11.4 nm,其中黑体数字表示Al_{0.15}Ga_{0.85}As势垒层的厚度,下划线的数字表示掺杂层的厚度,掺杂浓度为1.6×10¹⁶ cm⁻³,普通数字表示GaAs层的厚度。图6给出了THz QCL材料的XRD测试曲线及模拟XRD曲线,从图中可以看到,多级衍射峰峰值较强且半高宽很小,表明生长的多量子阱材料晶体质量好,周期界面很平整。对比测试曲线和模拟曲线,两条曲线衍射峰吻合得很好,说明实验生长的材料组分和各层厚度控制较为准确。

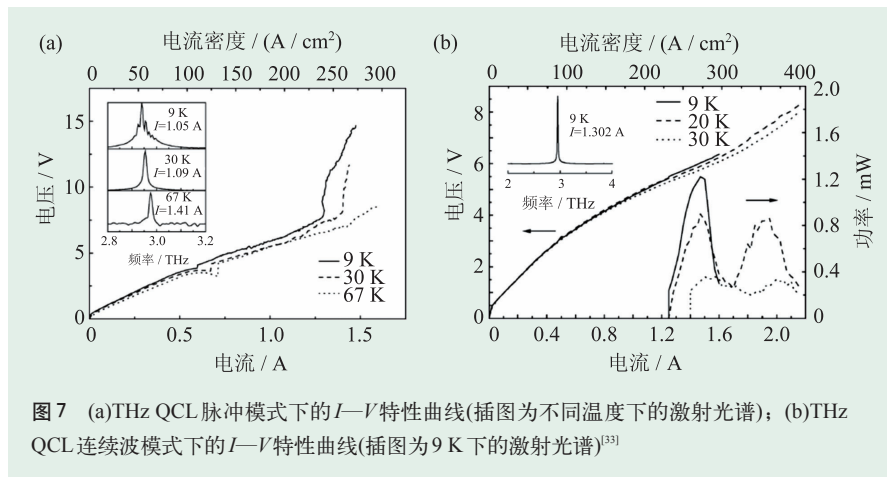
图7给出了该器件的激射光谱(见插图),以及在脉冲模式(图7(a))和连续波模式(图7(b))下电压和电流的关系曲线。可以看出,器件激射频率约2.95 THz,在脉冲模式下,9 K工作温度下器件表现为法布里—珀罗(F-P)腔多

模激射,具有很宽的频谱范围。随着工作温度增大,器件变为单模激射,最高工作温度为67 K。在连续波模式下,器件为单模激射,阈值电流密度最低为230 A/cm²,最大光输出功率为1.2 mW。为了进一步提高器件的性能,可考虑在端面镀高反射膜以降低激光器的镜面损失,进行各向异性刻蚀以降低波导损耗,还可以在减薄片背面镀金以提高器件的散热性能等。

3 THz 半导体探测器

3.1 THz 量子阱探测器

THz QWP是中红外QWP在THz波段的自然扩展,二者在器件性能和特点上具有相似性^[12, 13]。首个THz QWP由刘惠春课题组与曹俊诚合作于2004年研制成功^[14],图8(a)中给出了该THz QWP的光电流响应谱。从图中可以看出,器件的峰值响应频率约在7.1 THz(对应的光子能量约为29.5 meV),33 meV至37 meV之间的曲线凹下去的区域为暗区,它是由GaAs光学声子吸收造成的。该器件成功地实现了对THz波的探测,但由图8(b)的电流—电压特性曲线可见,该器件尚不能达到背景限工作性能。2005年,刘惠春课题组改进了THz QWP的结构,成功实现了背景限工作性能^[15]。三个不同结构的THz QWP响应峰值分别为9.7 THz,5.4 THz和3.2 THz,背景限温度分别达到了17 K,13 K和12 K。



从应用需求发展方向来看,提高器件灵敏度,提升工作温度,以及实现大规模探测阵列是未来 THz QWP 研究的重点关注方向。而目前 THz QWP 的研究主要存在以下问题:(1)相对于红外的 QWP,由于 THz 光子能量非常小,因此 THz QWP 的子带间能级非常小,这样电子间的多体相互作用对器件的性能会造成很大的影响;(2)量子

阱中的掺杂浓度相对较低,目的主要是为了降低器件暗电流,但这也限制了子带间的吸收效率,从而影响了灵敏度;(3)子带间跃迁选择定则造成器件在正入射条件下无法正常工作,从而不利于焦平面阵列的构建。对于第(1)个问题,需要将多体效应引入器件模拟中,从而对器件设计进行指导;而对于第(2)和第(3)个问题,则需要进行器件光耦合器等方面的研究,这样,在解决正入射情况下的电场偏振问题的同时,通过实现高的光耦合效率来增强器件对 THz 光子的吸收效率,进而实现正入射条件下可工作的高灵敏度 THz QWP。

THz QWP 的探测性能可通过调节有源区量子阱的宽度和势垒高度(即 Al 的组分)来实现。曹俊诚课题组与刘惠春从理论和实验方面研究了两组器件 V266 和 V267 的光电流谱特性,研究结果如图 9 所示。两个器件的结构参数可参阅文献[15]。研究中考考虑的两种主要多体效应为交换关联和退极化效应^[34, 35]。从图 9 可以看出,当不包括任何多体相互作用时,理论和实验间的响应峰值位置能量差分别为 5.6 meV (24.8%, V266)与 4.8 meV (36.0%, V267);当考虑静态交换关联势后,能量差分别下降到 2.4 meV (10.6%, V266)和 2.6 meV (19.4%, V267);当进一步考虑动态极化效应时,理论和实验间的响应峰值位置能量差分别降低到 0.2 meV (0.9%, V266)和 1.1 meV (8.2%, V267)。实际上,交换关联势使量子阱变深,导

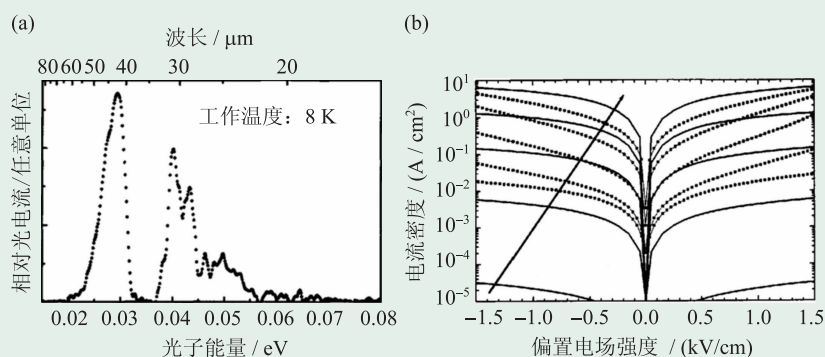


图 8 (a)第一个 THz QWP 的光电流响应谱; (b)第一个 THz QWP 在不同温度下的暗电流特性(工作温度自下而上分别为 15 K, 20 K, 25 K, 30 K, 35 K; 实心黑点线为测量结果, 普通线为模拟结果)^[14]

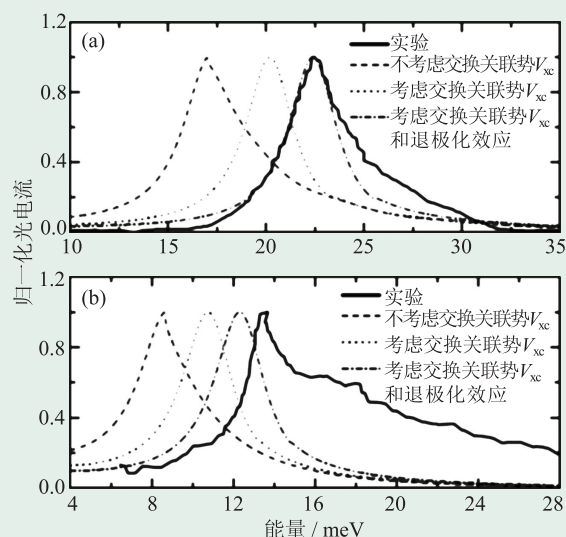


图 9 理论和实验得到的 THz QWP 光电流谱^[4] (a) V266 THz QWP; (b) V267 THz QWP^[34]

致子带基态和第一激发态移动到更低的能量区域,它们之间的能量差变大。因此,在 THz QWP 设计中考考虑多体相互作用是非常必要的。

在器件的光耦合方面,曹俊诚课题组与刘惠春合作研究了一维金属光栅耦合 THz QWP、金属微腔耦合 THz QWP 和表面等离子体耦合 THz QWP^[36-38]。一维金属光栅耦合 THz QWP 结构简单,且非常有效,不仅能够使器件在正入射条件下工作,还能达到较高的响应率^[36]。金属微腔耦合 THz QWP 如图 10(a)所示,该结构与一维金属光栅耦合 THz QWP 类似,区别在于在器件下电极以下插入了一层金属,这样和器件表面的光栅金属形成了金属微腔。金属微腔耦合 THz

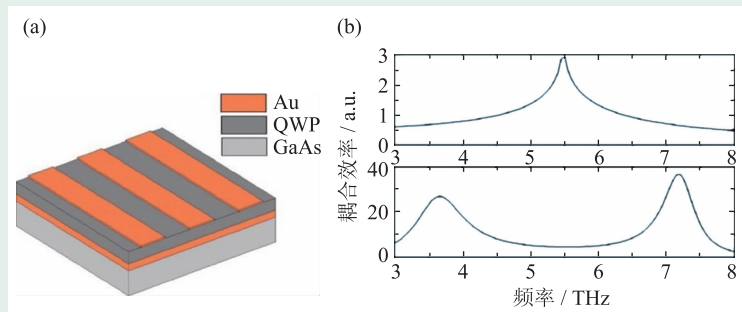


图10 (a) 金属微腔耦合 THz QWP 结构示意图; (b) 上图为金属光栅的耦合特性; 下图为微腔耦合器的耦合特性^[37]

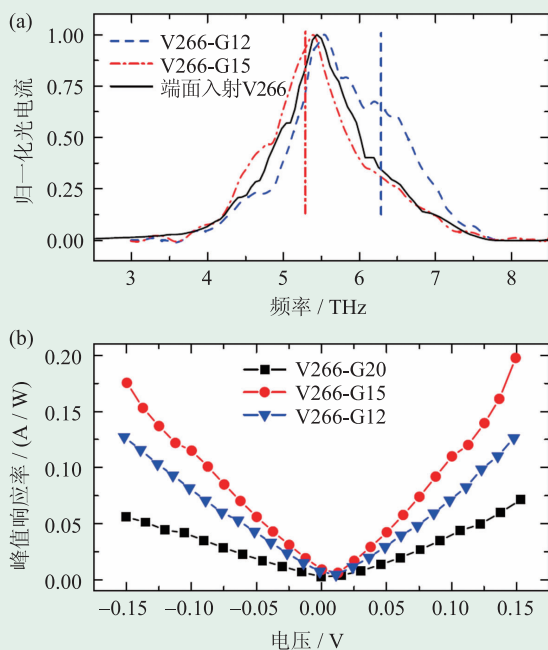


图11 (a) V266-G12(虚线)和 V266-G15(点划线)的归一化光电流谱, 同时给出端面入射 V266(实线)的光电流谱作为对比。竖直线表示光栅的截止频率, 其中竖直虚线对应 12 μm 周期的光栅, 竖直点划线对应 15 μm 周期的光栅; (b) V266-G12, V266-G15 和 V266-G20 的峰值响应率^[39]

OWP 的共振特性由光栅和微腔共同决定, 因此在耦合特性上出现了两个共振峰(见图 10(b))。通过优化微腔结构参数可得到期望的共振频率, 耦合效率也会得到上百倍的提高^[37]。表面等离子体耦合 THz QWP 的结构与一维金属光栅耦合 THz QWP 也非常类似, 仅在上电极层进行了适度重掺杂, 使得其等离子体频率在需要的频率范围内。当光正入射在器件表面时, 上电极层表面的表面等离子体将被激发, 光栅的作用是提供激发所需

的额外波矢。研究表明, 这种耦合方式也可将耦合效率提高 30 倍^[38]。

在器件的制备方面, 我们设计、优化并表征了一维金属光栅耦合 THz QWP^[39, 40]。器件台面大小为 1500 $\mu\text{m} \times$ 1500 μm 的正方形, 光栅金属为 Ti/Pt/Au (25/55/300 nm), 生长在台面的上表面。器件结构为 V266, 峰值响应频率为 5.4 THz。我们采用模式方法研究了器件中电磁场的分布情况, 模拟了

了光栅的耦合效率。结果表明, 当光栅的周期等于入射 THz 波在 GaAs 中的波长时, 耦合效率达到最大。光栅的周期应与器件的峰值响应频率匹配。对于 V266, 光栅周期应为 14.6 μm 。为了证实这一点, 我们制作了 3 个 THz QWP: V266-G12, V266-G15 和 V266-G20, 光栅周期分别为 12 μm , 15 μm 和 20 μm 。图 11(a) 给出了它们的光电流谱的测量结果。从图中可以看出, V266-G12 的光电流谱发生了扭曲, 而 V266-G15 的光电流谱则没有明显的形变, 仅表现出很小的红移。图中的竖直线表示光栅的位置, 用于解释扭曲的形成。根据模拟结果, 竖直线表示的频率对应于衍射效率最高的入射波频率: 15 μm 光栅为 5.28 THz (点划线); 12 μm 光栅为 6.27 THz (虚线)。由于这个效应, V266-G12 的光电流谱中在竖直虚线附近出现了一个肩膀; 而对于 V266-G15, 由于竖直点划线与 V266 的响应峰值非常接近, 所以没有出现明显的扭曲。V266-G20 的光电流谱与 45° 磨角端面入射器件相似, 没有在图中给出。相似的可能原因在于它的响应峰相对较窄, 而光栅位置位于探测器的主要响应频率范围之外, 从而没有对光谱的形状造成明显的影响。根据图 11(a) 中的光电流谱, 得到了不同周期光栅的 V266 峰值响应率, 画在图 11(b) 中。测量条件与之前相同。在 0.15 V 偏压下, V266-G12, V266-G15 和 V266-G20 的峰值响应率分别为 0.128, 0.197 和 0.070 A/W。可以看出, 15 μm 周期的光栅效率最高, 与我们的理论模拟一致。该研究结果表明, 一维光栅是一种有效的光耦合器, 当光栅

的周期与器件峰值响应波长一致时,器件的响应率可得到有效的提高。

3.2 双层石墨烯纳米带 THz 探测器

近年来,在 THz 探测方面的前沿课题研究中,基于石墨烯(Graphene)材料的探测技术^[16-18]也受到了广泛的关注。

石墨烯是一种由碳原子按六角蜂窝结构紧密堆积成的二维体系。自 Novoselov 与 Geim^[41]首次成功制备石墨烯以来,它就成为基础理论与应用研究的热点。石墨烯系统的光学性质的研究一直是最受关注。人们在理论上计算了单层石墨烯、双层石墨烯以及多种石墨烯纳米带的电导。所有这些研究都表明,石墨烯和石墨烯纳米带的光学响应都极其微弱,这强烈地制约了石墨烯在电子学和光子学中的应用。

张潮课题组与曹俊诚的合作研究表明,有一类具有特定结构的双层石墨烯纳米带,对 THz 和远红外光具有不同寻常的强光学响应,对 THz 和远红外光敏感的双层纳米带峰值电导比单层石墨烯中观测到的普适电导 $e^2/4h$ 高出约两个数量级^[18]。图 12 给出了这类双层石墨烯纳米带的光电导特性,并用单层石墨烯普适电导 $\sigma_0 = e^2/4h$ 做了归一化。对于 zig-zag 双层石墨烯纳米带,零能隙点的位置在 K 点,两个低能带色散关系曲线近似于抛物线性的,低能下带间跃迁的强度非常小。而对于扶手椅型双层石墨烯纳米带,零能隙点在 Γ 点,而且两个低能带的色散关系曲线非常接近于线性(或者是一个一维零质量狄拉克费米子)。在这种情况下,非对称能带间的跃迁极其强烈,光电导达到 $80\sigma_0$ 。电导峰值的位置在 THz 和远红外区域,并且可由纳米带的宽度来调节。这一特性有望开辟一条以石墨烯为基础的器件应用途径,比如石墨烯 THz 光电探测器。

4 THz 成像

THz 成像^[43-47]是 THz 应用技术中的一个重要

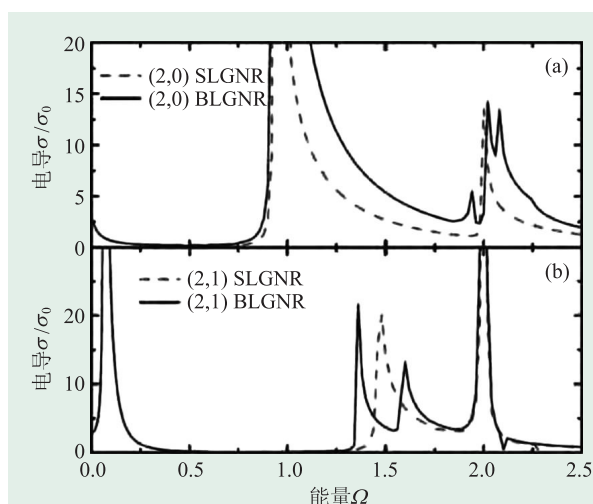


图 12 (a)zig-zag 双层石墨烯纳米带的光电导; (b)扶手椅型双层石墨烯纳米带的光电导,在狄拉克扶手椅型双层石墨烯纳米带中,光电导约为 $80\sigma_0$ ^[18]。(图中 SLG NR 为单层石墨烯纳米带, BLG NR 为双层石墨烯纳米带,采用 Ezawa 提出的方式^[42],即用括号中的数字 (p, q) 来描述石墨烯纳米带的结构)

方向。它是指利用 THz 辐射作为信号源及相应探测器进行成像的一种技术。实验和理论分析表明,THz 波对非极性材料(如硬纸板、塑料、泡沫材料等)具有较好的穿透性,能够探测隐藏的违禁物品;THz 辐射成像的分辨率高,成像对比度和均匀性好,对许多毒品、化学和生物制剂等较为敏感,能有效地鉴别多种常规手段无法识别的伪装等。由于大量有机分子的转动和振动能级以及半导体的子带和微带能量均在 THz 范围,很多有机物质的 THz 光谱具有“指纹”特性,因而 THz 成像可实现物质成分的鉴别。利用 THz 指纹谱还可进行敏感物质的识别,被遮蔽物的检查,安全医疗诊断成像等。与常规微波遥感成像相比,THz 波具有更高的分辨率,可以实现对更小目标的探测和成像;与红外和可见光相比,THz 波对沙尘和烟雾具有更好的穿透能力,便于实现全天候工作;与 X 射线相比,THz 光子能量低,频率为 1 THz 的电磁波能量只有 4 meV,不会对生物组织产生有害的电离和破坏。因此,THz 波成像技术可与其他频段的电磁波成像技术形成互补,在物质探测、大气层临边(中高层大气)探测等方面显示出良好的应用前景,为科学研究提供了一种新的强有力的方法。另外,随着人们的出

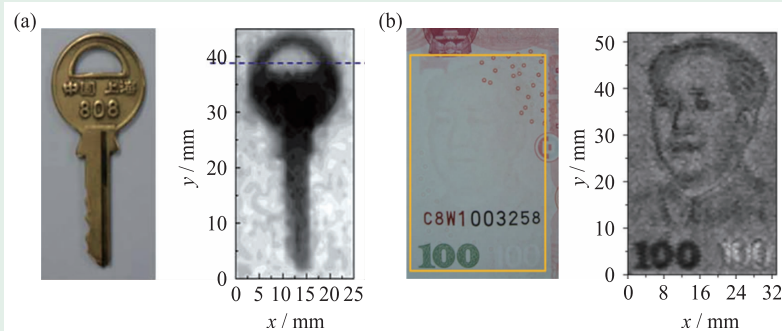


图 13 (a) 钥匙置于信封中的 THz 透射成像；(b) 人民币水印区域的 THz 透射成像。分辨率为 0.5 mm ^[50, 51]

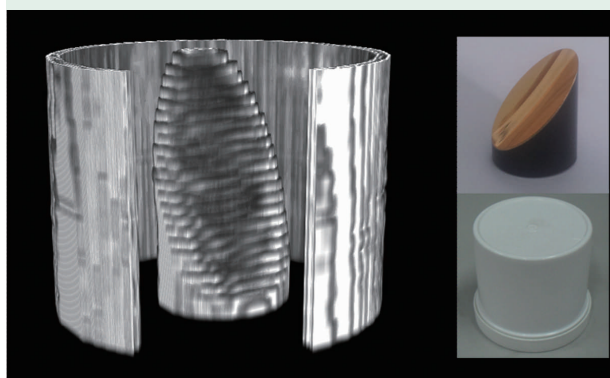


图 14 THz 断层扫描成像：置于白色塑料盒中的离轴抛物面镜^[52]

行越来越频繁，致使火车站、机场等重要公共场所的安检压力迅速增加，在拥有被检物品的指纹谱库之外，急需一种能快速而便捷的成像手段，以加快安检的速度，缓解重要公共场所的安检压力。因此，发展 THz 成像技术具有重要的现实意义。

1995 年 Hu 等^[46]采用太赫兹脉冲系统完成了对树叶和硅基电路的成像实验，从成像效果可以看出，太赫兹波能很好地透过样品，同时还原图像具有较高的分辨率。在医学成像方面，Woodward 等^[47]利用太赫兹波完成了对基底细胞癌和皮肤癣症的病变区域识别。病变细胞由于角质水合作用，使得细胞水分含量产生变化，通过探测反射信号的强弱，可标志出病变区域。在 THz 无损检测方面，张希成^[48]和 Abbott^[49]等课题组进行了较为全面的实验和优化。借鉴 X 射线的断层扫描技术，太赫兹波同样可以实现对样品的断层扫描，整个过程中无需接触样品就能了解内部结构和缺陷

等情况，并重建出三维图像。

曹俊诚课题组采用 THz QCL 或者黑体作为辐射源，THz QWP 作为探测器进行了一系列 THz 成像的研究^[50—52]。图 13(a)中左边的钥匙放在信封中，右边是 THz 透射成像的效果。图 13(b)中是对 100 元人民币水印区域成像的效果，水印部分图像清晰可见，分辨率达到了 0.5 mm 。此外，我们还实现了 THz 断层扫描成像，

如图 14 所示。离轴抛物面镜放在白色塑料盒中，通过断层扫描，完整的三维图像得以重建。此外，胡青课题组和曹俊诚课题组均实现了以 THz QCL 为光源和以商用 THz 阵列相机为探测器的实时成像。

5 THz 无线通信

正如 Edholm 的带宽定律所描述的那样^[53]，在过去 25 年内，短距离无线通信系统的带宽需求每隔 18 个月翻一番。按照这种趋势，在未来 10 年内，人们对无线通信速率的需求将达到 15 Gb/s 。为了满足这么高的速率要求，方法之一是提高微波无线通信系统或毫米波无线通信系统的频谱利用率。然而采用这种方法，无疑会增加系统的复杂度和经济成本；而且根据香农定理，这种方法提供的数据传输能力依旧有限。从长远来看，更高速率的无线通信系统需要采用更高频率的载波。基于 THz 波的特点及其在通信方面的巨大应用潜力，在未来的高速无线通信中，载波走向 THz 频段是一个非常合理的选择^[54, 55]。

目前，世界上很多课题组都开发出了 THz 无线通信演示系统，大部分的频带都在数百 GHz。比如，NTT 公司采用单行载流子光电二极管为发射器，肖特基势垒二极管为探测器，搭建了一套 300 GHz 无线通信演示系统，实现了 24 Gbit/s 比特率的无差错传输^[56]。Asada 课题组开发了一套

基于共振隧穿二极管的THz无线通信系统，他们利用集成了偏移缝隙天线的共振隧穿二极管作为发射源，肖特基势垒二极管作为探测器，采用强度调制方式，实现了传输频点为542 GHz的无线通信^[57]。

载波频率高于1 THz的通信系统则主要是基于THz QCL和THz QWP来实现的。2009年，刘惠春课题组完成了基于THz QCL和THz QWP的全光学通信链路演示实验^[58]。发射源为工作在脉冲模式的THz QCL，探测器为THz QWP，采用强度调制方式，传输一路音频信号。通信频点为3.8 THz。在发射端，用音频基带信号对一个重复频率为455 kHz、脉宽为8 ns、最大电压为17 V的电压脉冲序列进行幅度调制，以此调制后的脉冲电压驱动THz QCL。在接收端，QWP输出的光电流经低噪声放大器放大，利用收音机的AM解调功能，还原出原始基带信号。

2009年，曹俊诚课题组实现了基于THz QCL和THz QWP的文本与图片传输演示^[59]。同年，利用工作在连续波模式的THz QCL作为发射源，光导型THz QWP作为探测器，采用幅度调制和直接检测方式，实现了音频信号的传输^[60]，系统带宽为580 kHz，传输频点为4.1 THz。图15给出了该通信装置的照片以及发射信号和接收信号的波形图。在此基础上，通过优化驱动电路和接收电路，通信带宽得到有效提升，实现了实时视频传输。视频传输的系统 and 效果如图16所示，传输频点在3.9 THz处，传输速率为2.5 Mb/s^[61]。

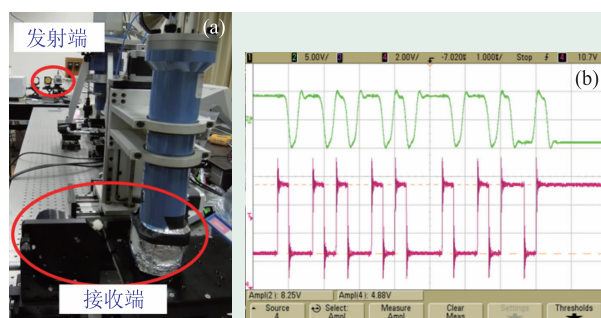


图15 (a)THz无线通信系统实验装置图；(b)驱动THz QCL的调制信号(下图)和THz QWP接收到的解调信号(上图)^[60]



图16 THz实时视频传输系统装置图(左图为发射前的光学视频；右图为通过THz波传输后接收到的实时视频)^[61]

极其迅速的交叉学科前沿领域。THz半导体器件由于其体积小、易集成和成本低等优点，在各类THz应用系统中占据不可或缺的地位。THz QCL及THz QWP由于其高速响应特性，在THz成像和通信应用系统中将发挥巨大作用。大力发展基于半导体器件的THz技术，将使各种新的THz应用系统成为可能。

6 结束语

THz科学与技术是一个应用前景广泛、发展

致谢 作者曹俊诚感谢课题组成员张戎博士、郭旭光博士和谭智勇博士在资料准备过程中给予的帮助。

刘惠春教授生平简介

刘惠春教授1960年3月26日生于山西太原，2013年10月23日因病于上海仁济医院去世，享年53岁。刘惠春教授1982年毕业于兰州大学，同年考取中美联合培养物理类研究生计划(CUSPEA)项目，赴美国匹兹堡大学攻读博士学位，并于1987年获得应用物理学博士学位。在1987—2010年的二十多年时间里，刘惠春教授任职于加拿大国家研究院，于2000年获加拿大国家研究院首席研究员最高学术职位。2004年成为美

国物理学会会士(APS Fellow), 2007年成为美国电子与电气工程师协会会士(IEEE Fellow), 2005年获中国自然科学基金委员会海外杰出青年基金资助, 2009年成为加拿大皇家科学院院士, 2010年入选中共中央组织部“千人计划”, 任上海交通大学物理与天文学系致远讲席教授。刘惠春教授是加拿大物理学家协会 Herzberg 奖章和德国 Friedrich Bessel 奖获得者。

刘惠春教授在30余年的学术生涯里, 取得了丰硕的研究成果。在红外与太赫兹量子电子学领域, 刘惠春教授在 *Science* 等刊物上发表杂志论文近400篇, 在学术会议上做邀请报告近100次。与哈佛大学 F. Capasso 教授合编 *Semiconductors and Semimetals* 丛书2卷: *Intersubband Transition in Quantum Wells: Physics and Device Applications I* 和 II; 与德国 Dresden Rossendorf 离子束研究所 H. Schneider 研究员合著完成 *Quantum Well Infrared Photodetector* 专著, 与曹俊诚合作完成 *Semiconductors and Semimetals* 丛书第84卷第4章: *Terahertz Semiconductor Quantum Well Photodetectors*。

参考文献

- [1] Ferguson B, 张希成. 物理, 2003, 32(05): 286
- [2] Ferguson B, Zhang X C. Nature Mater., 2006, 1: 26
- [3] 曹俊诚. 物理, 2006, 35(08): 632
- [4] 曹俊诚. 物理, 2006, 35(11): 953
- [5] 顾立, 谭智勇, 曹俊诚. 物理, 2013, 42(12): 695
- [6] Köhler R, Tredicucci A, Beltram F *et al.* Nature, 2002, 417: 156
- [7] Williams B S. Nature Photon., 2007, 1: 517
- [8] Qin Q, Williams B S, Kumar S *et al.* Nature Photon., 2009, 3: 732
- [9] Kumar S, Chan C W I, Hu Q. Nature Phys., 2011, 7: 166
- [10] Fatholouloumi S, Dupont E, Chan C W I *et al.* Opt. Express, 2012, 20: 3866
- [11] Lu X F, Zhang X C. Phys. Rev. Lett., 2012, 108: 123903
- [12] Liu H C, Luo H, Song C Y *et al.* IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., 2008, 14: 374
- [13] Guo X G, Cao J C, Zhang R *et al.* IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., 2013, 19: 8500508
- [14] Liu H C, Song C Y, SpringThorpe A J *et al.* Appl. Phys. Lett., 2004, 84: 4068
- [15] Luo H, Liu H C, Song C Y *et al.* Appl. Phys. Lett., 2005, 86: 231103
- [16] Ang Y S, Sultan S, Tawfiq A. J. Infrared Milli Terahz Waves, 2012, 33: 816
- [17] Xu X G, Sultan S, Zhang C *et al.* Appl. Phys. Lett., 2010, 97: 011907
- [18] Wright A R, Cao J C, Zhang C. Phys. Rev. Lett., 2009, 103: 207401
- [19] Cao J C. Phys. Rev. Lett., 2003, 91: 237401
- [20] Cao J C, Lei X L, Liu H C. Solid-State Electron., 2003, 47: 1897
- [21] Cao J C, Lei X L, Li A Z *et al.* Appl. Phys. Lett., 2001, 78: 2524
- [22] Cao J C, Lei X L. Phys. Rev. B, 1999, 59: 2119
- [23] Cao J C, Liu H C, Lei X L. J. Appl. Phys., 2000, 87: 2867
- [24] Zhang X C, Hu B B, Darrow J T *et al.* Appl. Phys. Lett., 1990, 56: 1011
- [25] Williams B S, Kumar S, Callebaut H *et al.* Appl. Phys. Lett., 2003, 83: 2124
- [26] Williams B S, Kumar S, Hu Q *et al.* Opt. Express, 2005, 13: 3331
- [27] Kumar S, Williams B S, Hu Q *et al.* Appl. Phys. Lett., 2006, 88: 121123
- [28] Luo H, Laframboise S R, Wasilewski Z R *et al.* Appl. Phys. Lett., 2007, 90: 041112
- [29] Kumar S, Chan C W I, Hu Q *et al.* Appl. Phys. Lett., 2009, 95: 141110
- [30] Kumar S, Chan C W I, Hu Q *et al.* Operation of a 1.8-THz Quantum-cascade Laser above 160 K. presented at the Conf. Lasers Electro-Opt., San Jose, CA, May 16—21, 2010
- [31] Kumar S. IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., 2011, 17: 38
- [32] Liu H C, Wächter M, Ban D *et al.* Appl. Phys. Lett., 2005, 87: 141102
- [33] 万文坚, 尹嵘, 谭智勇等. 物理学报, 2013, 62: 210701
- [34] Guo X G, Tan Z Y, Cao J C *et al.* Appl. Phys. Lett., 2009, 94: 201101
- [35] Guo X G, Zhang R, Liu H C *et al.* Appl. Phys. Lett., 2010, 97: 021114
- [36] Zhang R, Guo X G, Cao J C *et al.* J. Appl. Phys., 2011, 109: 073110
- [37] Guo X G, Zhang R, Cao J C *et al.* IEEE J. Quantum Electron., 2012, 48: 728
- [38] Guo X G, Zhang R, Cao J C *et al.* IEEE J. Quantum Electron., 2012, 48: 1113
- [39] Zhang R, Guo X G, Song C Y *et al.* IEEE Electron Device Lett., 2011, 32: 659
- [40] Zhang R, Guo X G, Cao J C *et al.* IEEE J. Quantum Electron., 2012, 48: 1214
- [41] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V *et al.* Science, 2004,

306:666

- [42] Ezawa M. Phys. Rev. B, 2006, 73:045432
- [43] Zandonella C. Nature, 2003, 424:721
- [44] Lee A W M, Williams B S, Kumar S *et al.* IEEE Photon. Technol. Lett., 2006, 18:1415
- [45] Lee A W M, Qin Q, Kumar S *et al.* Appl. Phys. Lett., 2006, 89:141125
- [46] Hu B B, Nuss M C. Opt. Lett., 1995, 20:1716
- [47] Woodward R M, Cole B E, Wallace V P *et al.* Phys. Med. Biol., 2002, 47:3853
- [48] Wang S, Zhang X C. J. Phys. D: Appl. Phys., 2004, 37:R1
- [49] Yin X X, Ng B W H, Ferguson B *et al.* IEEE Sensors J., 2007, 7:342
- [50] Zhou T, Zhang R, Guo X G *et al.* IEEE Photon. Technol. Lett., 2012, 24:1109
- [51] Tan Z Y, Zhou T, Cao J C *et al.* IEEE Photon. Technol. Lett., 2013, 25:1344
- [52] Zhou T, Tan Z Y, Gu L *et al.* Three-dimensional Imaging with Terahertz Quantum Cascade Laser and Quantum Well Photodetector, unpublished
- [53] Cherry S. IEEE Spectrum, 2004, 41:58
- [54] Piesiewicz R, Kleine-Ostmann T, Krumbholz N *et al.* IEEE Antenn. Propag. M., 2007, 49:24
- [55] Kürner T. Terahertz Science and Technology, 2012, 5:11
- [56] Song H J, Ajito K, Muramoto Y *et al.* Electron. Lett., 2012, 48:953
- [57] Ishigaki K, Shiraish M I, Suzuki S *et al.* Electron. Lett., 2012, 48, 582
- [58] Grant P D, Laframboise S R, Dudek R *et al.* Electron. Lett., 2009, 45:952
- [59] 谭智勇, 陈镇, 韩英军等. 物理学报, 2012, 61:098701
- [60] Chen Z, Tan Z Y, Han Y J *et al.* Electron. Lett., 2011, 47:17
- [61] Chen Z, Gu L, Tan Z Y *et al.* Chin. Opt. Lett., 2013, 11:112001



ILOPE-2014[®]

www.ilope-expo.com



ILOPE—北京光电展

北京国际光电产业博览会 暨

第十九届中国国际激光·光电子及光电显示产品展览会

北京·中国国际展览中心（三元桥）2014年10月15日-17日

主办单位

中国国际贸易促进委员会
中国国际展览中心集团公司
中国光学光电子行业协会

支持单位

中国工业和信息化部
中国兵器工业集团公司
美国光电协会
德国光学、医疗精密设备协会

中国科技部
北京生产力促进中心
美国光学工程学会
财团法人光电科技工业协进会

中国科学院
北京光机产业基地
日本光产业技术振兴会
北京市市政工程总公司（集团）

中国物理学会
中国图形图像学学会
韩国光产业振兴会

承办单位

中国光学光电子行业协会
中展集团北京华港展览有限公司

展品范围

激光与红外产品及设备
光电材料与元件

光电显示及照明
光学元件与材料

LED & OLED & FPD
光通讯设备