

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

基于超短激光脉冲泵浦金属-绝缘体-半导体结构的太赫兹辐射产生

黄彬, 刘翔, 余健雄, 杜海伟

引用本文:

黄彬, 刘翔, 余健雄, 等. 基于超短激光脉冲泵浦金属-绝缘体-半导体结构的太赫兹辐射产生[J]. 光电工程, 2024, 51(12): 240249.

Huang B, Liu X, Yu J X, et al. Terahertz generation based on the ultrashort laser pulses pumped metal-insulator-semiconductor heterostructure[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(12): 240249.

<https://doi.org/10.12086/oe.2024.240249>

收稿日期: 2024-10-23; 修改日期: 2024-12-02; 录用日期: 2024-12-03

相关论文

Highly efficient vectorial field manipulation using a transmitted tri-layer metasurface in the terahertz band

Huan Zhao, Xinke Wang, Shutian Liu, Yan Zhang

Opto-Electronic Advances 2023, 6(2): 220012 doi: 10.29026/oea.2023.220012

太赫兹矢量光束的研究进展

胡浩, 胡晓雪, 贡丽萍, 席思星, 王晓雷

光电工程 2024, 51(8): 240071 doi: 10.12086/oe.2024.240071

一种多波束可旋转的金属波导太赫兹阵列天线

蒋钊, 黄峻堃, 张敏, 苏红, 李玲, 梁华伟

光电工程 2023, 50(9): 230140 doi: 10.12086/oe.2023.230140

更多相关论文见光电期刊集群网站 



光电工程
Opto-Electronic Engineering

<http://cn.ojournal.org/oe>

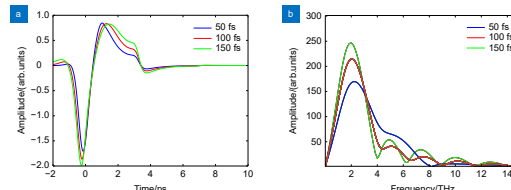


 OE_Journal



Website

基于超短激光脉冲泵浦金属-绝缘体-半导体结构的太赫兹辐射产生



黄彬¹, 刘翔¹, 余健雄¹, 杜海伟^{1,2*}

¹南昌航空大学仪器科学与光电工程学院, 江西 南昌 330063;

²南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室, 江西 南昌 330063

摘要: 利用超短激光脉冲泵浦半导体表面或者半导体异质结可以产生太赫兹脉冲辐射。基于超短激光脉冲泵浦金属-绝缘体-半导体异质结的太赫兹辐射产生物理模型, 通过数值模拟和理论分析研究了载流子密度和速度在半导体内部的变化规律, 分析了超短激光脉宽、载流子寿命以及半导体厚度等参数对太赫兹辐射的影响和物理机制。结果显示, 超短激光脉宽的增加会提高太赫兹脉冲的幅值, 降低太赫兹脉冲中心频率和半峰全宽; 载流子寿命和半导体材料厚度的增加对太赫兹辐射的中心频率和半峰全宽有不同程度的降低作用。通过分析不同参数对产生太赫兹辐射的影响, 获得了该作用过程优化宽带太赫兹脉冲产生的途径和参数。本文结果对开展相关实验提供了较好的理论参考。

关键词: 太赫兹; 超短激光; 金属-绝缘体-半导体; 异质结; 脉宽

中图分类号: O434.3

文献标志码: A

黄彬, 刘翔, 余健雄, 等. 基于超短激光脉冲泵浦金属-绝缘体-半导体结构的太赫兹辐射产生 [J]. 光电工程, 2024, 51(12): 240249

Huang B, Liu X, Yu J X, et al. Terahertz generation based on the ultrashort laser pulses pumped metal-insulator-semiconductor heterostructure[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(12): 240249

Terahertz generation based on the ultrashort laser pulses pumped metal-insulator-semiconductor heterostructure

Huang Bin¹, Liu Xiang¹, Yu Jianxiong¹, Du Haiwei^{1,2*}

¹School of Instrument Science and Optoelectronic Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang, Jiangxi 330063, China;

²Key Laboratory of Nondestructive Testing (Ministry of Education), Nanchang Hangkong University, Nanchang, Jiangxi 330063, China

Abstract: Terahertz pulse radiation can be generated by pumping semiconductor surfaces or semiconductor heterojunctions with ultrashort laser pulses. Based on the model of terahertz generation from metal-insulator-

收稿日期: 2024-10-23; 修回日期: 2024-12-02; 录用日期: 2024-12-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (12064028); 江西省自然科学基金项目 (20232BAB201045); 南昌航空大学研究生创新专项 (YC2024-S638)

*通信作者: 杜海伟, haiweidu@nchu.edu.cn。

版权所有©2024 中国科学院光电技术研究所

semiconductor heterostructure pumped by ultrashort laser pulses, the changes of carrier density and velocity in semiconductors are studied through numerical simulations and theoretical analysis. The influences and physical mechanisms of ultrashort laser pulse duration, carrier lifetime, and semiconductor thickness on the terahertz generation are analyzed as well. The results show that the increase of the laser pulse duration increases the amplitude of the terahertz pulse but decreases its central frequency and bandwidth. The increases of the carrier lifetime and thickness of the semiconductor have different influences on the central frequency and bandwidth of terahertz pulse. By analyzing the influence of different parameters on the terahertz generation, the pathways and parameters of optimizing the terahertz generation are obtained. The results of this paper provide a good theoretical reference for the related experiments.

Keywords: terahertz; ultrashort laser; metals-insulators-semiconductors; heterostructure; pulse duration

1 引言

太赫兹波 (Terahertz, THz) 是指频率在 0.1~10 THz (1 THz=10¹² Hz) 的电磁波, 该波段位于红外与微波之间^[1-2], 波长处于 30 μm~3 mm 之间, 是电子学技术与光子学技术、宏观到微观的过渡区域^[3]。由于太赫兹波段在电磁频谱的特殊位置, 它具有很多优越的特性和应用, 如太赫兹成像^[4]、无线通讯^[5]、太赫兹光谱技术、无损检测^[6]等。目前常用超短激光脉冲与物质相互作用产生宽带太赫兹辐射, 如利用超短激光脉冲泵浦光电导天线或等离子体产生太赫兹辐射^[7-9]。

得益于超短激光技术与半导体材料及加工技术的快速发展, 可以设计、制备半导体异质结, 从而可以将半导体材料和其他材料一层层堆叠形成异质结元件从而具有特殊的光电性能。其中, 利用超短激光泵浦半导体产生光生载流子, 使载流子在内置电场或外加偏置电场下产生超快振荡的电流并对外辐射太赫兹波, 成为提供宽带、强场太赫兹脉冲辐射的途径之一。半导体表面经过超短激光脉冲泵浦后在反射方向产生太赫兹辐射主要取决于两个过程: 超快载流子运输和光整流效应^[10-11]。前者是由于半导体表面经超短激光脉冲泵浦后产生大量的光生载流子, 从而在半导体表面形成表面电场, 驱使载流子从半导体表面向其深处扩散形成快速振荡的光电流; 后者是半导体中的 Photo-Dember 效应产生太赫兹辐射, 这是因为载流子密度差产生的扩散效应引起的扩散电流导致的太赫兹辐射^[12], 即表面电场与丹倍电场共同作用下引起的电荷分离与载流子的瞬态运动会使得半导体表面向外辐射太赫兹脉冲。光电导天线产生太赫兹辐射主要经过半导体材料以透射方式产生太赫兹辐射, 而半导体表面产生太赫兹辐射主要从其表面以反射方式产生太赫兹

辐射, 从而为某些特殊场合的应用 (如表面成像) 提供太赫兹辐射源。

金属-绝缘体-半导体 (Metals-insulators-semiconductors, MIS) 是半导体器件中的一种基本异质结结构^[13], 这种结构受到超短激光脉冲激励作用会向外辐射太赫兹波。本文基于超短激光脉冲泵浦金属-绝缘体-半导体结构产生太赫兹辐射的物理模型, 结合数值计算详细分析了激光脉冲和异质结各项参数对产生的太赫兹辐射的影响和机制, 并获得这些参数与太赫兹脉冲之间的关系, 从而探索优化太赫兹产生的途径。本文对开展超短激光泵浦半导体异质结产生强的宽带的太赫兹辐射实验提供了很好的理论参考。

2 超短激光脉冲泵浦金属-绝缘体-半导体结构产生太赫兹辐射的物理模型

利用超短激光泵浦金属-绝缘体-半导体异质结产生宽带太赫兹辐射的物理模型示意图如图 1 所示。超短激光脉冲呈 45°入射在异质结表面, 该半导体结构分为三层, 表面是一层极薄的 ITO (indium tin oxide, 即掺锡氧化铟, 一种具有良好的导电性和低光学反射率的透明聚合物) 金属薄膜, 其厚度一般为几十纳米, 以此半透明电极作为栅极来产生偏置电场^[14]; 中间是二氧化硅材料制作的绝缘体, 厚度比 ITO 金属薄膜略大, 约为百纳米, 在没有通外加电压的时候处于绝缘状态; 最下面是 P 型硅半导体, 其厚度占了整体结构的很大一部分, 载流子的产生和输运主要在这一部分进行, 其厚度用参数 x 表示。在工业制备 MIS 结构过程中, 首先要准备半导体基底, 即硅片经过清洗和预处理以确保表面干净无杂质; 其次要生长绝缘层,

主要通过热氧化、化学气相沉积或其他技术实现在半导体基底上生长一层二氧化硅; 最后是沉积金属层, 将铝、铜等导电性良好的金属通过物理气相沉积、化学气相沉积或溅射等方法在绝缘层上沉积形成金属层。为了使金属层有良好的透光性, 本文 MIS 结构的金属层使用 ITO 薄膜以兼顾导电性和透光性。在制备过程中, 由于材料是一层层生长, 如果制备工艺不当或者材料质量不佳, 可能会导致各层之间粘附力不足, 从而产生缝隙, 因此需要严格控制工艺流程和材料质量减少缝隙的产生。在金属薄膜和半导体硅之间施加直流电压, 从而在结构内产生偏置电场, 超短激光脉冲入射金属-绝缘体-半导体结构的表面时, 光生载流子在电场的作用下加速运动形成振荡的光电流, 从而向外辐射太赫兹波。

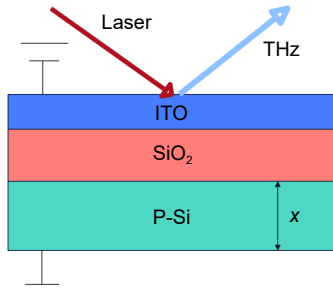


图 1 超短激光脉冲泵浦金属-绝缘体-半导体异质结构产生太赫兹辐射示意图

Fig. 1 Schematic of the terahertz generation from metal-insulator-semiconductor heterostructure pumped by the ultrashort laser pulses

激光入射半导体时当激光脉冲的光子能量大于半导体材料禁带宽度时, 在半导体内产生光生载流子, 被激发的光生载流子通过加速或扩散的超快过程形成光电流^[15-17]:

$$J(t) = \sum_i n_i(t) e v_i(t), \quad (1)$$

式中: 角标 i 表示随着激光脉冲的传播, 不同时刻产生的载流子, $n(t)$ 、 $v(t)$ 分别表示光生载流子的密度和速度, 即各个不同时刻产生的载流子密度和对应的速度乘积直接决定了光电流大小和特性。在半导体内部光生载流子的密度依赖激光脉冲的激励和电子、空穴之间的耦合, 并随着时间逐步演化^[18]:

$$\frac{dn(t)}{dt} = -\frac{n(t)}{\tau_c} + G(t) = -\frac{n(t)}{\tau_c} + G_0 \exp\left(-\frac{t^2}{T^2}\right), \quad (2)$$

式中: τ_c 是光生载流子的寿命, $G(t)$ 是光生载流子的产生速率, 它的产生速率由初始的载流子密度 G_0 和超短激光的脉宽 T 决定。产生的光生载流子在电场的

作用下加速运动, 其加速电场主要含两部分, 一是外加的偏置电场 E , 二是由于超短激光的泵浦产生的载流子在半导体里面产生的一个内置电场 E_B , 二者可分别表示为

$$E = \frac{V_g}{x}, \quad (3)$$

$$E_B = \frac{V_s}{w}, \quad (4)$$

式中: V_g 是外加的偏置电压, x 是半导体层的厚度; V_s 是半导体的表面电势, w 是内置场的厚度。当激光脉冲入射硅和氧化物薄层之间的界面时, 光电子和空穴被激发, 并由界面附近的内置电场诱导产生瞬态电流。根据电荷分布的泊松方程, 半导体的表面电场 E_s 和表面电势有如下的关系:

$$E_s = \frac{\sqrt{2kT}}{qL_D} F\left(\frac{qV_s}{kT}, \frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right), \quad (5)$$

式中: L_D 为德拜长度, q 为基本电荷量, k 为玻尔兹曼常数, T 为温度, n_{p0} 和 p_{p0} 分别表示电子和空穴载流子的密度, $F\left(\frac{qV_s}{kT}, \frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right)$ 是根据泊松方程得到的电势分布函数, 其具体表达式为

$$F\left(\frac{qV_s}{kT}, \frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right) = \left\{ \left[\exp\left(-\frac{qV_s}{kT}\right) + \frac{qV_s}{kT} - 1 \right] + \frac{n_{p0}}{p_{p0}} \left[\exp\left(\frac{qV_s}{kT}\right) - \frac{qV_s}{kT} - 1 \right] \right\}^{1/2}. \quad (6)$$

根据高斯定律, 表面电荷和表面电场有如下的关系:

$$Q_s = \epsilon_0 \epsilon_r E_s. \quad (7)$$

与此同时, 表面电容由其定义可知:

$$C_s = \left| \frac{dQ_s}{dV_s} \right|. \quad (8)$$

内置场厚度 w 用下式表示:

$$w = \sqrt{\frac{2\epsilon_0 \epsilon_r V_s}{N_i}}, \quad (9)$$

式中: ϵ_0 是真空介电常数, ϵ_r 是半导体的介电常数, N_i 为半导体的掺杂密度。由于载流子在半导体内的运动遵循牛顿运动定律, 因此光生载流子在半导体中的运动方程最终可表示为

$$\frac{d^2x}{dt^2} = e \left(\frac{V_g}{x} + \sqrt{\frac{2\epsilon_0 \epsilon_r}{N_i V_s}} \right), \quad (10)$$

式中: e 为电子电荷量, m^* 为载流子有效质量。在理想的半导体 MIS 结构中, 可以将偏置电压看成半导

体的表面电压和氧化层的电压串联, 根据电容基本公式其符合如下关系:

$$V_g = V_s + V_{ox}, \quad (11)$$

$$\frac{V_s}{V_{ox}} = \frac{C_{ox}}{C_s}, \quad (12)$$

式中: V_{ox} 是氧化层的电压, C_{ox} 是氧化层的电容。当偏置电压和半导体结构参数确定, 即可得到外加的偏置电压和表面电势的关系, 而后代入式 (10) 以获得载流子的速度、位移与时间的关系。

通过上述式 (1)~式 (12) 可计算出载流子密度、速度和时间的关系, 以及光电流随时间的演化规律, 再利用光电流与辐射到远场的电磁波之间的关系 $E_{THz}(t) \propto \frac{dJ(t)}{dt}$, 即可获得产生的电磁波电场波形。利用超短激光脉冲泵浦半导体材料, 其电子密度变化、光电流振荡周期均在飞秒-皮秒量级^[19], 从而产生频率位于太赫兹波段的电磁波, 即太赫兹波。由傅里叶变换即可从太赫兹电场时域波形获得其频谱分布规律。

3 仿真结果与讨论

利用数值计算对上述微分方程进行数值求解, 并代入其他方程中结合数值微分和积分等运算可得到超短激光泵浦光生载流子的密度、速度、光电流随时间的关系、太赫兹电场波形和频率。通过改变激光脉冲和半导体材料参数开展数值实验, 以便研究不同条件下产生的太赫兹辐射特点和优化条件。

首先利用四阶龙格-库塔算法对微分方程式 (2) 进行求解和计算。载流子寿命取 1 ps, 当初始密度为 $9.7 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ 时, 在飞秒激光的脉宽分别为 50 fs、100 fs、150 fs 时得到光生载流子密度的时间演化规律如图 2 所示。可以看到, 光生载流子产生和湮灭发生在皮秒量级, 上升沿和下降沿不对称即在与脉宽相近很短的时间内快速上升然后略微缓慢地下降并趋于零; 随着超短激光脉宽的增加, 其光生载流子的密度峰值也相应地提高。

而后利用数值方法对微分方程式 (10) 进行求解, 取偏置电压为 10 V, 载流子有效质量为 $0.056 m$, m 为电子的惯性质量。半导体掺杂浓度为 $5.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, 通过泊松方程推导得到在一定偏置电压条件下的表面电势, 代入微分方程得到光生载流子速度与时间的关系, 如图 3 所示。由于计算结果显示光生载流子的速

度随着时间会出现周期性变化, 故需要根据其实际运动的长度 (即图 1 中半导体的厚度 x) 取一定范围, 该图显示了光生载流子在半导体内部的微观运动情况。可以看到由于外加电压和光照的影响, 光生载流子得到加速, 其速度大小慢慢提高; 由于内部载流子逐步产生、聚集并导致内置电场的增加, 光生载流子被加速的方向可能会和外加电压相反, 因此光生载流子速度大小和方向发生周期性变化。在该结构中半导体厚度确定的条件下, 光生载流子末速度具有一定限制; 改变半导体厚度, 其光生载流子的速度也会随之改变, 因此可通过改变半导体层的厚度实现对光电流和太赫兹辐射的控制或优化。

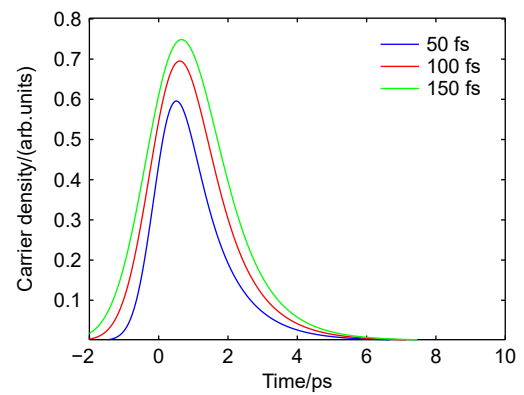


图 2 不同脉宽的激光脉冲泵浦产生的载流子密度变化趋势

Fig. 2 Trends of carrier density generated by the laser pulses with different pulse durations

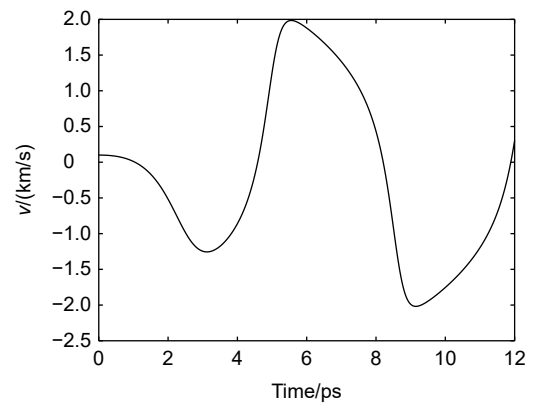


图 3 载流子速度变化曲线

Fig. 3 Changing of the velocity of the carriers

光电流的大小由光生载流子的密度和速度决定。把载流子的密度和速度代入式 (1), 并在时域对不同时刻的电流进行叠加, 即可得到超短激光泵浦金属-绝缘体-半导体结构产生的总的光电流和太赫兹电场波形, 结果如图 4(a) 所示。可以看出太赫兹脉冲在皮

秒量级, 经过傅里叶变换可得到其对应的频谱分布, 如图 4(b) 所示, 即太赫兹脉冲的中心频率在 2 THz 左右; 随着超短激光脉宽的增加, 太赫兹脉冲的峰值随之增加, 中心频率和带宽略有变化。对于不同的激光脉宽, 其会影响泵浦能量向太赫兹脉冲转化的效率, 较长的激光脉宽会产生更长的光电流从而使得太赫兹辐射增强, 但是其带宽变窄。

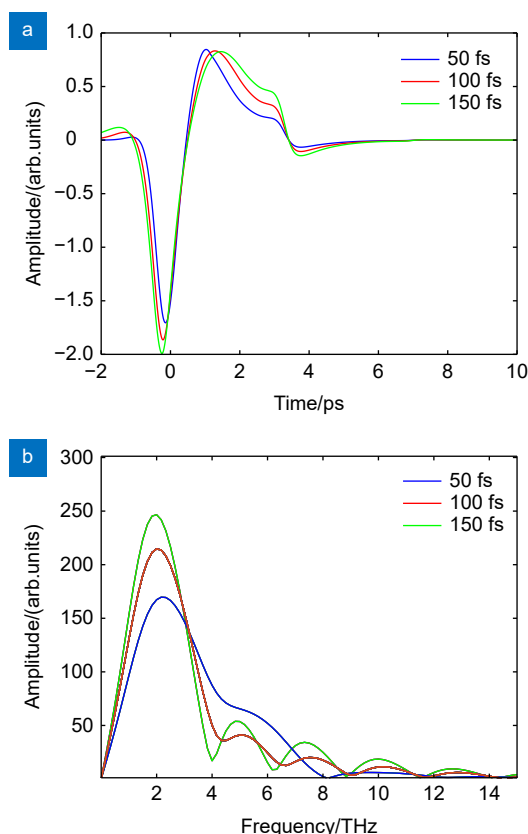


图 4 脉宽不同的激光脉冲泵浦产生的太赫兹脉冲。(a) 时域波形; (b) 对应的频谱分布

Fig. 4 Terahertz pulses produced by laser pulse with different pulse durations. (a) Time-domain waveforms; (b) Corresponding spectra distribution

接下来讨论超短激光脉宽对产生的太赫兹脉冲中心频率和带宽(半峰全宽)的影响。采用脉宽不同的超短激光脉冲产生太赫兹脉冲, 开展数值实验, 获得激光脉宽与太赫兹脉冲中心频率和带宽的关系, 如图 5(a) 所示。在载流子寿命为 1 ps 时随着超短激光脉宽的增加, 太赫兹脉冲的中心频率逐渐下降, 从 2.7 THz 降到 2 THz 左右。图 5(b) 是激光脉宽与太赫兹带宽的关系, 从图中可以看出超短激光脉宽小于 50 fs 时对太赫兹的带宽影响较大, 带宽的下降较为明显, 而后带宽随激光脉宽的增加缓慢下降。即较短的激光脉宽更有利于激发太赫兹高频部分; 当激光脉

宽增加到一定范围, 其产生的太赫兹脉冲时域振荡趋于稳定, 从而使得其带宽变化变得缓慢。

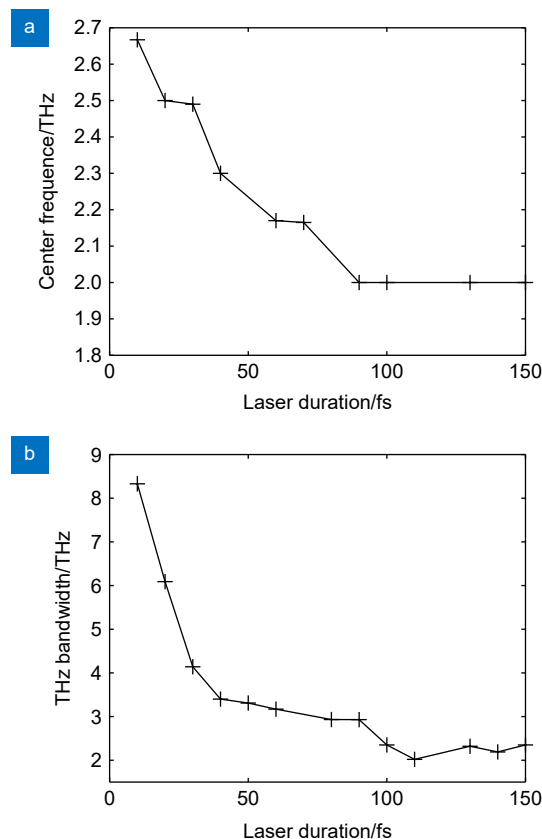


图 5 激光脉宽对 (a) 太赫兹脉冲中心频率和 (b) 带宽的影响

Fig. 5 Influence of the laser pulse duration on the (a) terahertz pulses central frequency and (b) bandwidth

接下来分析载流子寿命对太赫兹辐射的影响。由式 (2) 可知, 载流子寿命主要通过影响其密度变化来影响光电流大小和太赫兹脉冲。在数值实验中载流子寿命从 0.5 ps 到 2.5 ps 逐步增加, 保持激光脉冲为 100 fs, 其他参数保持不变, 从而获得载流子寿命与太赫兹脉冲中心频率和带宽的变化关系, 如图 6 所示。即随着载流子寿命的提高, 太赫兹中心频率和带宽不断降低, 但是降低的幅度略有不同; 载流子寿命在 0.5 ps 时, 太赫兹中心频率和带宽为最高; 而后随着载流子寿命的增加二者逐步降低。因此产生高频和宽带的太赫兹脉冲需要采用载流子寿命较短的半导体材料以及较短的激光脉宽。

在上述异质结元件中, 为了产生更强的太赫兹辐射, 一方面需要考虑金属薄膜的厚度, 即过厚的金属薄膜虽然减小了表面电阻提高了导电性, 但是其透光性会降低, 从而减弱入射到半导体表面的激光光强降

低太赫兹波辐射; 同理, 金属薄膜过薄会增加透光性, 但是会影响其导电性, 使外加的偏置电场效果降低, 所以本文的 ITO 薄膜的厚度约为几十纳米。另一方面异质结中绝缘层的厚度应尽可能薄, 因为产生光生载流子的主要区域在半导体表面, 应使泵浦激光透射率尽可能高。光生载流子在半导体中运动, 其厚度对光生载流子的速度有一定影响 (如图 3 所示)。改变半导体厚度参数 x , 进而分析产生的太赫兹脉冲特点。图 7 为半导体厚度与太赫兹脉冲中心频率 (图 7(a)) 和带宽 (图 7(b)) 的关系, 可以看出随着半导体厚度的增加, 中心频率和带宽均变小; 当半导体的厚度达到 300 nm 后, 其带宽保持在 2.6 THz 左右。这是由于当异质结的厚度增大到 300 nm 后, 超短激光脉冲由于穿透深度的减小而泵浦作用减弱, 故载流子的密度和速度降低到一定限度, 使得太赫兹辐射的带宽也到达一定限度。

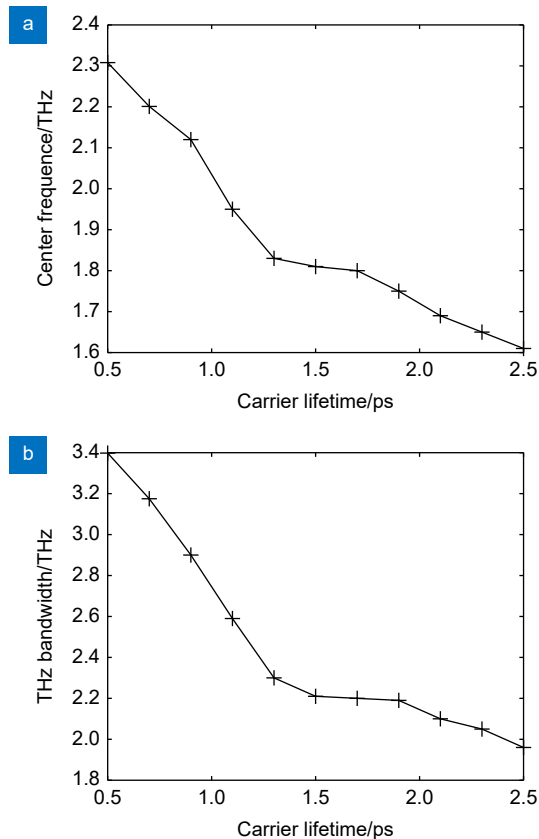


图 6 载流子寿命对 (a) 太赫兹脉冲中心频率和 (b) 带宽的影响

Fig. 6 Influence of the carrier lifetime on (a) the terahertz pulse central frequency and (b) bandwidth

由于载流子的有效质量会影响光生载流子的速度, 因此也会对太赫兹辐射有一定的影响。即当有效质量

变大时, 经过电场加速的载流子速度会减小, 进而光电流也会减小, 其产生的太赫兹辐射会减弱。同理有效质量变小时, 太赫兹辐射会增强。因此对于不同能带结构的半导体材料, 由于载流子有效质量的不同也会导致太赫兹辐射特性发生一定变化。本文使用的是载流子主要为空穴的 P 型半导体, 而 N 型半导体的载流子主要是自由电子, 二者的区别在于平带电压以及掺杂浓度, 即当使用相同的正向配置电压, P 型半导体辐射的太赫兹脉冲会更强; 而使用相同的反向偏置电压时, N 型半导体辐射的太赫兹脉冲会更强。

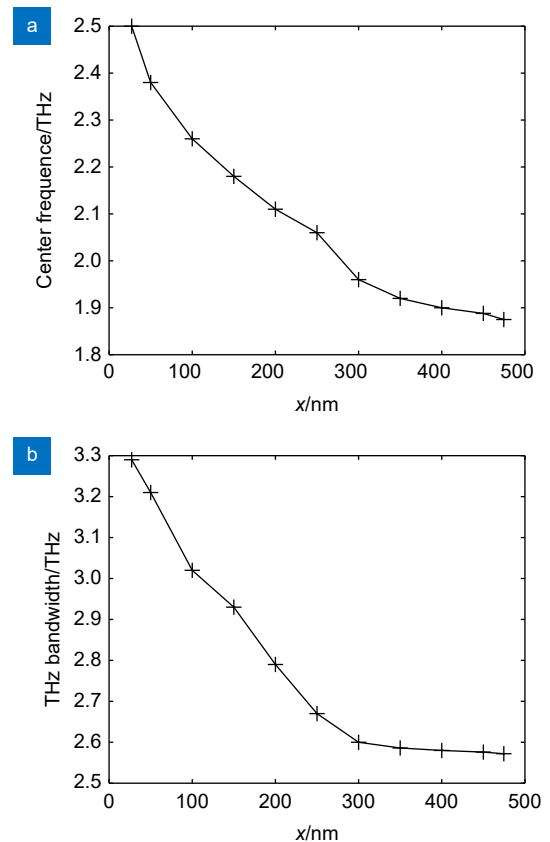


图 7 异质结中半导体厚度对 (a) 太赫兹脉冲中心频率和 (b) 带宽的影响

Fig. 7 The influence of semiconductor thickness in heterojunction on (a) the terahertz pulse central frequency and (b) bandwidth

偏置电压、半导体的掺杂水平以及 Photo-Dember 效应以及超短激光的波长和功率等内外部条件的不同, 也会使太赫兹辐射的电场强度发生变化。当外加的偏置电压等于平带电压时, 此时的太赫兹电场强度应该为零, 但是由于 Photo-Dember 效应, 使得仍然有微弱的太赫兹辐射; 半导体的掺杂水平越高, 对太赫兹电场强度的提高越明显。这是由于掺杂水平越高, 会在半导体中引入额外的载流子, 使得载流子

的浓度提高, 由式 (1) 可知, 产生的光电流就会增强, 从而对太赫兹电场强度的提高就越明显。不同的半导体材料具有不同的禁带宽度, 使用合适的激光提供足够的光子能量来激发半导体中的电子, 使其从价带跃迁到导带, 从而产生光生载流子。因此本文中使用的超短激光的波长为 800 nm, 其光子能量大于半导体禁带宽度。

与光电导天线产生太赫兹辐射物理机制不同, 金属-绝缘体-半导体异质结元件中半导体表面反射太赫兹辐射是外加的偏置电场和内生电场共同加速载流子形成。而光电导天线是偏置电压直接加速超短激光在天线内部泵浦产生的光生载流子形成快速振荡的电流, 以此透射产生太赫兹波。在本结构中, 半导体厚度能够影响内生电场大小和载流子速度大小从而对可以改变产生的太赫兹脉冲。由于内生电场的存在使得该技术可能产生比光电导天线更强的太赫兹辐射。采用超短激光脉冲泵浦多层半导体异质结过程中, 半导体材料特性和厚度等影响该过程产生的太赫兹波, 有望提供新的宽带太赫兹辐射源^[20]。注意到采用整形飞秒激光脉冲与晶体或者等离子体作用时, 能够调控这些作用过程产生的太赫兹脉冲^[21-23]。若采用整形飞秒激光脉冲泵浦上述金属-绝缘体-半导体结构, 由于激光脉冲包络发生变化, 其产生的载流子密度变化规律也将随之改变, 从而将会改变光电流的振荡和太赫兹辐射特性, 可能达到优化或调谐太赫兹脉冲的目的。总之, 利用半导体制备和材料加工技术能够为太赫兹辐射源和器件提供很大的便利, 从而推动了太赫兹技术及应用的发展^[24-25]。

4 总 结

利用半导体成熟的制备技术制备半导体异质结元件, 有可能为太赫兹辐射源提供新的思路。在超短激光脉冲泵浦金属-绝缘体-半导体异质结元件产生太赫兹辐射的物理过程中, 载流子受到偏置电场和内生电场作用发生振荡, 在半导体中加速运动形成光电流, 从而向外辐射太赫兹脉冲。本文通过数值模拟和理论分析, 研究了光生载流子寿命、超短激光脉宽、以及半导体材料厚度与太赫兹脉冲的关系。结果表明: 1) 当光生载流子寿命越短, 产生的太赫兹辐射的中心频率越高、带宽越宽, 随着载流子寿命的增加, 太赫兹中心频率和带宽逐步降低; 2) 当超短激光的脉宽增加时, 太赫兹脉冲的中心频率和带宽随之降低, 当激光

脉宽增加到 100 fs 后, 太赫兹中心频率变化较为缓慢; 3) 增加半导体材料的厚度, 则太赫兹的中心频率和带宽先快速下降而后缓慢下降。本文结果对于认识超短激光泵浦半导体异质结元件产生太赫兹辐射的机制有很好的帮助, 对开展宽带太赫兹辐射源的研究提供了新的思路, 为开展相关实验提供了一定的理论参考。

利益冲突: 所有作者声明无利益冲突

参考文献

- [1] Hafez H A, Chai X, Ibrahim A, et al. Intense terahertz radiation and their applications[J]. *J Optics*, 2016, **18**(9): 093004.
- [2] Zhong S C. Progress in terahertz nondestructive testing: a review[J]. *Front Mech Eng*, 2019, **14**(3): 273-281.
- [3] Ferguson B, Zhang X C. Materials for terahertz science and technology[J]. *Nat Mater*, 2002, **1**(1): 26-33.
- [4] Hartwick T S, Hodges D T, Barker D H, et al. Far infrared imagery[J]. *Appl Optics*, 1976, **15**(8): 1919-1922.
- [5] Harter T, Ummethala S, Blaicher M, et al. Wireless THz link with optoelectronic transmitter and receiver[J]. *Optica*, 2019, **6**(8): 1063-1070.
- [6] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology[J]. *Nat Photonics*, 2007, **1**(2): 97-105.
- [7] Auston D H. Picosecond optoelectronic switching and gating in silicon[J]. *Appl Phys Lett*, 1975, **26**(3): 101-103.
- [8] Van Exter M, Fattinger C, Grischkowsky D. High-brightness terahertz beams characterized with an ultrafast detector[J]. *Appl Phys Lett*, 1989, **55**(4): 337-339.
- [9] Sun W F, Wang X K, Zhang Y. Terahertz generation from laser-induced plasma[J]. *Opto-Electron Sci*, 2022, **1**(8): 220003.
- [10] Yardimci N T, Jarrahi M. Nanostructure-enhanced photoconductive terahertz emission and detection[J]. *Small*, 2018, **14**(44): 1802437.
- [11] Yang S H, Jarrahi M. Navigating Terahertz spectrum via photomixing[J]. *Opt Photonics News*, 2020, **31**(7): 38-43.
- [12] Apostolopoulos V, Barnes M E. THz emitters based on the photo-Dember effect[J]. *J Phys D Appl Phys*, 2014, **47**(37): 374002.
- [13] Yang D X, Tonouchi M. Understanding terahertz emission properties from a metal-insulator-semiconductor structure upon femtosecond laser illumination[J]. *J Appl Phys*, 2021, **130**(5): 055701.
- [14] Ramakrishnan G, Ramanandan G K P, Adam A J L, et al. Enhanced terahertz emission by coherent optical absorption in ultrathin semiconductor films on metals[J]. *Opt Express*, 2013, **21**(14): 16784-16798.
- [15] Zhang X C, Auston D H. Optoelectronic measurement of semiconductor surfaces and interfaces with femtosecond optics[J]. *J Appl Phys*, 1992, **71**(1): 326-338.
- [16] Zhang X C, Hu B B, Darrow J T, et al. Generation of femtosecond electromagnetic pulses from semiconductor surfaces[J]. *Appl Phys Lett*, 1990, **56**(11): 1011-1013.
- [17] Ulbricht R, Hendry E, Shan J, et al. Carrier dynamics in semiconductors studied with time-resolved terahertz spectroscopy[J]. *Rev Mod Phys*, 2011, **83**(2): 543-586.
- [18] Fan W H, Yan H, Jiang X Q, et al. Ultrafast terahertz characteristic spectroscopy based on femtosecond laser and

its application (invited)[J]. *Acta Photonica Sin*, 2022, **51**(7): 0751403.

范文慧, 闫慧, 江晓强, 等. 基于飞秒激光的超快太赫兹特征波谱技术及其应用 (特邀)[J]. *光子学报*, 2022, **51**(7): 0751403.

- [19] Tonouchi M. Simplified formulas for the generation of terahertz waves from semiconductor surfaces excited with a femtosecond laser[J]. *J Appl Phys*, 2020, **127**(24): 245703.
- [20] Sun C M, Li Q S, Wang J Y, et al. Influence and optimization of interference effect in GaAs p-i-n structure on terahertz wave generation[J]. *Chin J Lasers*, 2023, **50**(22): 2214001.
- 孙长明, 李强爽, 王婧仪, 等. 砷化镓 p-i-n 结构中的干扰效应对太赫兹波产生的影响与优化[J]. *中国激光*, 2023, **50**(22): 2214001.
- [21] Du H W, Xu C. THz generation from slow turn-on, rapid turn-off femtosecond laser pulses interaction with gas plasma[J]. *Infrared Laser Eng*, 2022, **51**(5): 20210361.
- 杜海伟, 许晨. 缓慢上升快速下降的飞秒激光脉冲与气体等离子体作用的太赫兹辐射产生研究[J]. *红外与激光工程*, 2022, **51**(5): 20210361.
- [22] Li Q S, Sun C M, Fan S Z, et al. Tunable broadband terahertz

wave generation based on optical rectification effect of shaped ultrashort laser pulses interacting with GaSe crystal[J]. *Acta Optica Sin*, 2023, **43**(5): 0519001.

李强爽, 孙长明, 范书振, 等. 整形超短激光脉冲与硒化镓晶体光整流效应的可调谐宽带太赫兹波产生[J]. *光学学报*, 2023, **43**(5): 0519001.

- [23] Yang N, Du H W. THz pulse generation from shaped femtosecond laser pulses interaction with gas-plasma[J]. *Opt Express*, 2014, **22**(21): 25494–25499.
- [24] Ma M, Jin L, Qin H, et al. Design of terahertz focusing lens based on high-resistivity silicon metasurface[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, **49**(7): 220032.
- 马敏, 靳琳, 秦华, 等. 基于高阻硅超表面结构的太赫兹聚焦透镜设计[J]. *光电工程*, 2022, **49**(7): 220032.
- [25] Zhang S J, Cao T, Tian Z. Progress on reconfigurable terahertz metasurface devices based on sulfide phase change materials[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(9): 230142.
- 张寿俊, 曹墩, 田震. 基于硫属化物相变材料的可重构太赫兹超表面器件的研究进展[J]. *光电工程*, 2023, **50**(9): 230142.

作者简介



黄彬 (2000-), 男, 硕士, 研究方向为太赫兹技术及其应用。

E-mail: 18720331591@163.com



【通信作者】杜海伟 (1980-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为太赫兹技术及其应用; 超快光学与超快现象。

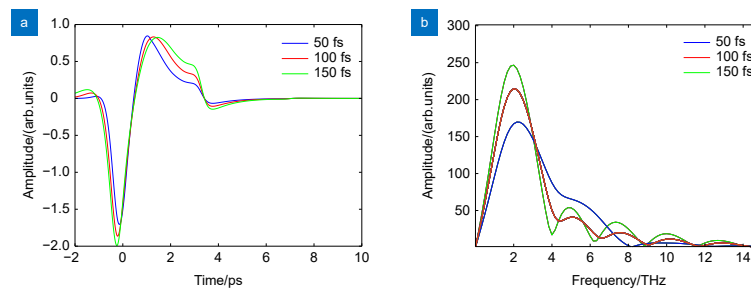
E-mail: haiweidu@nchu.edu.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

Terahertz generation based on the ultrashort laser pulses pumped metal-insulator-semiconductor heterostructure

Huang Bin¹, Liu Xiang¹, Yu Jianxiong¹, Du Haiwei^{1,2*}



Terahertz pulses produced by laser pulse with different pulse durations

Overview: Thanks to the rapid development of ultrashort laser technology, semiconductor materials, and their processing technology, semiconductor heterojunctions can be designed and fabricated. For example, semiconductor materials and other materials can be stacked layer by layer to form heterojunction elements with special optoelectronic properties. Among them, the ultrashort laser-pumped semiconductor is used to generate photogenerated carriers, so that the carriers can generate ultrafast oscillating currents and broadband terahertz radiation, which has become one of the ways to provide broadband and strong-field terahertz pulse radiation.

Based on the physical model of terahertz radiation generated by ultrashort laser pulse-pumped metal-insulator-semiconductor (MIS) structures, the influence of laser pulses and heterojunction parameters on the terahertz radiation are investigated in detail with numerical calculations. Then the relationships between these parameters and terahertz pulses are obtained, to obtain the ways to optimize the terahertz generation from this structure.

The time-domain waveform (Fig. 4(a)) and frequency spectra (Fig. 4(b)) of the terahertz pulses are obtained numerically, and the influences of the pulse width (Fig. 5), carrier lifetime (Fig. 6) and semiconductor thickness (Fig. 7) on the central frequency and bandwidth of terahertz pluses are obtained and analyzed in detail as well. In addition, the influences of the wavelength and power of ultrashort laser on terahertz pulses were discussed. The physical mechanisms behind are analyzed.

In the physical process of terahertz radiation generated by ultrashort laser pulse-pumped MIS heterojunction elements, the carriers oscillate under the biased electric field and endogenous electric field, which accelerate them in the semiconductor to form a photocurrent, and thereby radiate terahertz pulses. In this paper, the relationship between photogenerated carrier lifetime, ultrashort laser pulse duration, and thickness of semiconductor materials and terahertz pulses is studied through numerical simulation and theoretical analysis. The results show that: 1) The shorter the lifetime of the photogenerated carriers is, the higher the central frequency and broader bandwidth of the terahertz pulses; 2) When the duration of the ultrashort laser increases, the central frequency and bandwidth of the terahertz pulses decrease, and the central frequency changes slowly when the pulse duration is longer than 100 fs; 3) When the thickness of the semiconductor material increases, the central frequency and bandwidth of terahertz will firstly decrease rapidly and then decrease slowly. This work will offer a good reference to the related experiment.

Huang B, Liu X, Yu J X, et al. Terahertz generation based on the ultrashort laser pulses pumped metal-insulator-semiconductor heterostructure[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(12): 240249; DOI: [10.12086/oee.2024.240249](https://doi.org/10.12086/oee.2024.240249)

Foundation item: Project supported by National Natural Science Foundation of China (12064028), Natural Science Foundation of Jiangxi Province (20232BAB201045), and Nanchang Hangkong University Graduate Innovation Project (YC2024-S638)

¹School of Instrument Science and Optoelectronic Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang, Jiangxi 330063, China; ²Key Laboratory of Nondestructive Testing (Ministry of Education), Nanchang Hangkong University, Nanchang, Jiangxi 330063, China

* E-mail: haiweidu@nchu.edu.cn