

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

孙长明¹, 李强爽¹, 王婧仪¹, 杜海伟^{1,2*}¹南昌航空大学测试与光电工程学院, 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 基于超短激光脉冲泵浦砷化镓(GaAs)p-i-n异质结结构产生太赫兹辐射模型,通过数值模拟和理论分析,研究了干扰效应对产生太赫兹辐射的影响,以及i层厚度与干扰效应之间的相关性。结果显示,干扰效应会降低太赫兹脉冲的强度并使其频谱展宽,而且随着i层厚度的增加干扰效应的影响也在增加,该结果与已有的蒙特卡罗模拟结果相近。数值实验表明,超短激光泵浦GaAs p-i-n结构产生太赫兹脉冲源自于该结构中i层内的载流子振荡,且太赫兹脉冲特性依赖于载流子的浓度分布,干扰效应的影响以及载流子浓度分布依赖于i层厚度。

关键词 太赫兹技术; 砷化镓; p-i-n异质结结构; 干扰效应

中图分类号 O474 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230463

1 引言

太赫兹(THz)波是指频率在0.1~10 THz(1 THz=10¹² Hz)范围内的电磁波,该波段在电磁波谱中位于微波与红外之间,波长范围30 μm~3 mm,是电子学技术与光子学技术、宏观与微观的过渡区域^[1-2]。由于太赫兹波段在电磁波谱中的特殊位置,使得它具有很多优越的特性,因此在光谱技术^[3]、6G通信^[4]、无损检测^[5]、生物医学成像^[6]、数字全息术^[7]等方面有着广阔的发展空间。随着太赫兹技术的发展,太赫兹辐射源作为太赫兹技术应用的基础得到了广泛的研究。然而,太赫兹辐射源的功率、光-太赫兹转换效率、太赫兹工作带宽都难以满足目前应用的严格要求^[8]。为了将太赫兹技术应用到日常生活中,我们迫切需要高功率、高能量、高效率且能够在室温下稳定运转、宽带可调的太赫兹辐射源。因此,太赫兹辐射源的研究还有待进一步发展。

太赫兹辐射源作为太赫兹技术中不可或缺的一部分,其效率直接决定太赫兹系统的运行性能。根据太赫兹波的产生方式以及其在电磁波谱中所处的位置,太赫兹辐射可以利用电子学技术和光学技术两种方法来产生。目前,常见的利用电子学技术产生太赫兹波的方法有反向波振荡器、耿氏振荡器、布洛赫振荡器等。它们具有体积小、结构紧凑等优点,可以在亚太赫兹区域产生频率连续调谐的相干输出。然而当频率

超过1 THz时,这类太赫兹辐射源的输出功率和工作效率就会急剧下降,并且使用寿命短,难以满足目前工程应用要求,因此尚未实现实用化、商业化。而近年来得益于超快激光器与低维半导体材料的快速发展,基于超短激光脉冲与半导体材料相互作用产生太赫兹辐射的方法也趋向于成熟,包括光电导天线^[9]、光整流^[10]、光差频^[11]、量子级联激光器^[12]、半导体表面^[13]等。

半导体表面经过超短激光脉冲泵浦后产生太赫兹辐射主要是两个过程的结果:超快载流子输运和光整流效应^[9-10]。超快载流子输运是由于半导体表面经过超短激光脉冲泵浦后会产生大量的光生载流子,从而在半导体表面形成表面电场。并且,在光激发后半导体表面与半导体深处存在载流子的浓度差,这会驱使载流子从半导体表面向半导体深处扩散。由于电子和空穴迁移率的差异,电子和空穴扩散的速度不同,因此会产生电子和空穴分离,就会在半导体表面形成光学丹倍电场(即丹倍效应)。在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出太赫兹脉冲。载流子的运动和半导体表面产生的太赫兹脉冲参数取决于光生载流子的浓度分布和相互作用。研究表明,砷化镓(GaAs)作为一种优良的半导体材料,经过超短激光脉冲激发后可以获得高浓度、高迁移率的光生载流子^[14],因此GaAs被广泛应用于半导体表面产生太赫兹脉冲^[15]。但是

收稿日期: 2023-01-16; 修回日期: 2023-02-24; 录用日期: 2023-03-15; 网络首发日期: 2023-03-22

基金项目: 国家自然科学基金(12064028)、南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室开放基金(EW202108218)

通信作者: *haiweidu@nchu.edu.cn

GaAs 多层异质结构产生太赫兹脉冲的研究并没有得到足够的重视。研究表明在相同的条件下 GaAs p-i-n 结构产生的太赫兹辐射强度普遍低于半导体表面产生的太赫兹辐射强度^[16],这是由于 p-i-n 结构中在表面电场和丹倍电场的共同作用下光生载流子的浓度与位置相关,即由光生载流子的输运产生的瞬变电流的振荡频率是依赖位置的。因此,载流子输运的瞬态响应在 p-i-n 结构中的不同区域是非相干的,这就使得在同一时间维度 p-i-n 结构中的不同区域由载流子运动产生的瞬变电流的振荡方向、相位、幅度不同。超短激光脉冲泵浦 GaAs p-i-n 结构产生的光电流是由 p-i-n 结构中不同区域的瞬变电流叠加的总电流,当不同区域瞬变电流的振荡相位与方向不同时所叠加的总电流的振幅远远小于不同区域瞬变电流的振荡相位与方向相同时所叠加的总电流的振幅。这种由于不同区域瞬变电流的振荡相位与方向不同造成的总电流的振幅减小即为干扰效应。该效应会降低超短激光脉冲泵浦 GaAs p-i-n 结构产生的总光电流的振幅,从而降低 p-i-n 结构产生的太赫兹辐射的强度。

本文基于超短激光脉冲泵浦 GaAs p-i-n 结构产生太赫兹辐射模型,采用数值计算方法研究了干扰效应对产生的太赫兹脉冲辐射的影响,并在 GaAs p-i-n 结构表面激发浓度相同的条件下,模拟不同 i 层厚度的 GaAs p-i-n 结构产生太赫兹脉冲的规律,分析并优化了 i 层厚度对于干扰效应以及太赫兹辐射产生的影响,并分析了蕴含的物理机制。

2 理论模型

模拟超短激光脉冲泵浦产生太赫兹脉冲辐射的 GaAs p-i-n 结构如图 1 所示。该结构由厚度为 100 nm、掺杂浓度为 $1.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的 p 型 GaAs,厚度为 4000 nm 的本征层(即 i 层)的 GaAs,厚度为 35 nm、掺杂浓度为 $1.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的 n 型 GaAs 构成。该模型的 p-i-n 结构参数在实际实验中已被用于超短激光脉冲泵浦 GaAs p-i-n 结构产生太赫兹脉冲辐射的初步验证^[17]。

当超短激光脉冲泵浦 p-i-n 结构后会在该结构的本征层产生大量的光生载流子,光生载流子产生与复

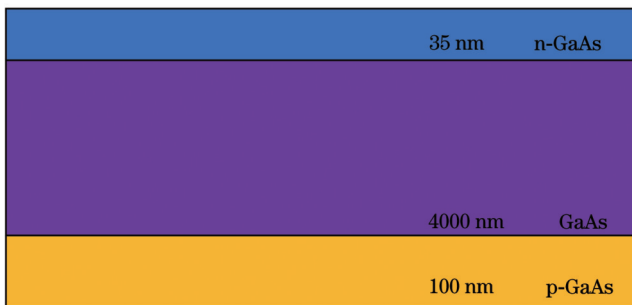


图 1 GaAs p-i-n 结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of GaAs p-i-n structure

合的动态过程会在本征层产生随时间变化的表面电场与丹倍电场,载流子在本征层内会受到表面电场与丹倍电场的共同驱动形成随时间变化的电流 $J(t)$ 。由于 $J(t)$ 完全是载流子的运动引起的,电流 $J(t)$ 与载流子的浓度 $n_i(t)$ 、载流子的运动速率 $v_i(t)$ 符合关系式

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

式中:下标 i 代表电子和空穴。

在无外加偏置电场的结构中,随时间变化的表面电势 $U_s(t)$ 与电流 $J(t)$ 符合关系式^[14]

$$\kappa \kappa_0 \frac{dU_s(t)}{dt} = J(t), \quad (2)$$

式中: κ 为相对介电常数; κ_0 为真空介电常数。

为了简化分析 GaAs p-i-n 结构在光激发后的超快载流子输运过程,可以假设光生载流子是瞬间产生的,即在超短激光脉冲激发 GaAs 材料后光生载流子在极短时间内到达浓度的最大值,而后逐步衰减,其衰减的速度与光生载流子的寿命有关。在 GaAs 材料中,光生载流子到达最大浓度所需时间远远小于载流子的持续时间。因此在整个载流子的运输过程中,假设载流子瞬间产生是合理的,泵浦激光脉冲强度可以近似为 $I(t) = I_0 \delta(t)$, I_0 为泵浦激光脉冲的峰值强度^[18]。式(2)可以表述为^[19]

$$\frac{dU_s(t)}{dt} = \frac{e}{\kappa \kappa_0} \int_0^L [n(z, t) v_e(z, t) + p(z, t) v_h(z, t)] dt, \quad (3)$$

式中: L 是 GaAs p-i-n 结构中 i 层的厚度; $v_e(z, t)$ 和 $v_h(z, t)$ 分别表示电子和空穴的速度; $n(z, t)$ 和 $p(z, t)$ 分别表示电子和空穴的密度。

在 GaAs p-i-n 结构中满足条件 $\alpha L \ll 1$, 式中 α 是 GaAs 的吸收系数。因此可进一步假设在整个瞬态过程中 i 层内与时间相关的电场 $E(t)$ 是均匀的。在上述假设下, i 层中随时间变化的载流子速度的空间分布是均匀的。因此可以忽略载流子速度与空间的相关性,仅考虑载流子速度与时间的相关性。基于上述假设的合理性,由式(3)可以得到 GaAs p-i-n 结构 i 层内电场 $E(t)$ 、电子和空穴的速度 $v_e(t)$ 和 $v_h(t)$ 、载流子浓度 $n_i(t)$ 遵守下述方程:

$$\frac{dE(t)}{dt} = \frac{e n_i(t)}{\kappa \kappa_0} [v_e(t) + v_h(t)]. \quad (4)$$

在 GaAs p-i-n 结构 i 层内,由于 $\alpha v_{e,h} \ll f$ (f 为简化的等离子体振荡频率,具体见下文),那么在整个瞬态过程中载流子的空间位移可以忽略,从而电子和空穴的平均速度主要由 i 层内电场 $E(t)$ 和动量弛豫率 γ 决定。因此可以用粒子的动量平衡方程来描述载流子的速度变化与电场 $E(t)$ 的关系^[16]:

$$\frac{dv_i(t)}{dt} = \frac{eE(t)}{m_i} - \gamma v_i(t). \quad (5)$$

为了简化计算,式(5)中电子和空穴的动量弛豫率取相同值 $\gamma = 7 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$ 。在式(5)中,对于电子和空穴分别对 t 微分,然后对两个方程求和,并且代入式(4),可以得到阻尼谐振子方程:

$$\frac{d^2 v(t)}{dt^2} + \gamma \frac{dv(t)}{dt} + \omega^2 v(t) = 0, \quad (6)$$

式中: $v(t) = v_e(t) + v_h(t)$; $\omega = (ne^2/\kappa\kappa_0 m^*)^{\frac{1}{2}}$ 表示简化的等离子体频率; m^* 为简化的电子和空穴的有效质量。

式(6)的初始条件为 $v(0) = 0$ 和 $\frac{dv}{dt} = eE_0/m^*$, $E_0 \approx \epsilon_g/L$ 为激光泵浦前的初始电场强度, ϵ_g 为 GaAs 的带隙能量。通过求解二阶线性常微分方程(6)的特征值方程得到 $v(t)$ 的通解,并代入方程的初始条件得到 $v(t)$ 的特解,即

$$v(t) = \frac{eE_0}{2\pi f m^*} \exp\left(-\frac{\gamma t}{2}\right) \sin(2\pi f t), \quad (7)$$

式中:简化的等离子体振荡频率 $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\omega^2 - \gamma^2/4}$ 。

在 GaAs p-i-n 结构 i 层内电子和空穴的密度分别可以表述为 $n(z, t) = n_{\text{exc}} \exp(-\alpha z) + n_1(z, t)$ 和 $p(z, t) = n_{\text{exc}} \exp(-\alpha z) + p_1(z, t)$, 其中 n_{exc} 为表面激发的电子空穴对的密度, n_1 和 p_1 分别为初始的电子密度和空穴密度。对于 GaAs 材料,由超短激光脉冲激发产生的电子空穴等离子体满足条件 $\alpha v_{e,h} \ll f$, 因此有 $n_1(z, t) \ll n_{\text{exc}} \exp(-\alpha z)$ 与 $p_1(z, t) \ll n_{\text{exc}} \exp(-\alpha z)$, 那么 i 层内平均载流子密度可以表述为 $\bar{n} = n_{\text{exc}} [1 + \exp(-\alpha z)]/2$ ^[20]。在不考虑载流子浓度与位置的相关性,即忽略了干扰效应对 GaAs p-i-n 结构产生太赫兹脉冲的影响时,可以用平均载流子密度 \bar{n} 来表示 i 层内的载流子密度。通过式(1)与式(7)可以得到忽略干扰效应时 i 层内的瞬态电流表达式:

$$J(t) = \frac{e^2 \bar{n} E_0 L}{2\pi f m^*} \exp\left(-\frac{\gamma t}{2}\right) \sin(2\pi f t). \quad (8)$$

在考虑干扰效应的影响时,由于载流子浓度与位置的相关性即载流子在 i 层内的非均匀分布,可以得到包含干扰效应的 i 层内瞬态电流表达式为

$$J(t) = \sum_{z=0}^L \frac{e^2 n(z, t) E_0}{2\pi f m^* L} \exp\left(-\frac{\gamma t}{2}\right) \sin(2\pi f t). \quad (9)$$

根据式(8)分别计算出 i 层厚度为 $4 \mu\text{m}$ 和 $0.4 \mu\text{m}$ 的 GaAs p-i-n 结构忽略干扰效应的瞬态光电流,根据式(9)分别计算出 i 层厚度为 $4 \mu\text{m}$ 和 $0.4 \mu\text{m}$ 的 GaAs p-i-n 结构考虑干扰效应的瞬态光电流,结果如图 2 所示。可以看出当 i 层厚度不同时,产生的瞬态电流波形不同,干扰效应对波形的影响也不相同;在 i 层厚度为 $4 \mu\text{m}$ 时,有无干扰效应对光电流的影响比较明显;在 i 层厚度为 $0.4 \mu\text{m}$ 时,有无干扰效应对光电流的影

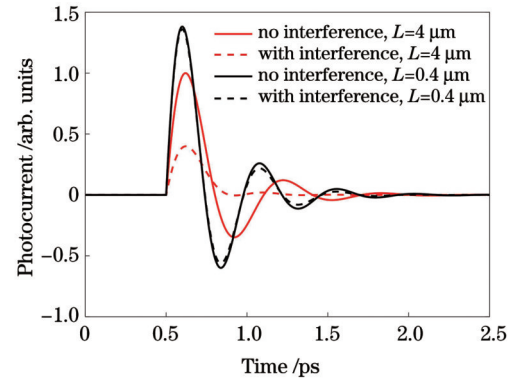


图 2 i 层厚度分别为 $4 \mu\text{m}$ 和 $0.4 \mu\text{m}$ 的 GaAs p-i-n 结构包括干扰效应与忽略干扰效应产生的瞬态光电流

Fig. 2 Transient photocurrent generated by GaAs p-i-n structure with thickness of i-layer of $4 \mu\text{m}$ and $0.4 \mu\text{m}$ with or without interference effect

响可以忽略。因此,干扰效应对光电流产生的太赫兹辐射也会随 i 层厚度的不同而不同。

3 结果与讨论

由电磁波基础知识可知,快速振荡的电流会向外产生电磁辐射。由图 2 可以看出本文中 GaAs p-i-n 结构产生的瞬态电流为亚皮秒量级快速振荡的电流,此时产生的电磁辐射也应在同一量级,脉冲频谱即位于太赫兹波段。根据 $E_{\text{THz}}(t) \propto \frac{dJ(t)}{dt}$ 即可分别计算出 i

层厚度为 $4 \mu\text{m}$ 和 $0.4 \mu\text{m}$ 的 GaAs p-i-n 结构包含干扰效应与忽略干扰效应产生的太赫兹电场时域波形,并经过傅里叶变换获得相应的频谱分布,结果如图 3 所示。图 3(a) 中太赫兹脉冲的时域波形在 0.5 ps 时瞬时产生,这是由于在数值模拟中设置了激光在 0.5 ps 时照射到 GaAs p-i-n 样品上,且在上述理论模型中假设了光生载流子瞬时产生。图 3(a) 中显示 i 层厚度为 $0.4 \mu\text{m}$ 产生的太赫兹电场强度明显强于 i 层厚度为 $4 \mu\text{m}$ 产生的太赫兹电场强度, i 层厚度为 $0.4 \mu\text{m}$ 时含有干扰效应与忽略干扰效应的电场强度曲线几乎完全重合,此时干扰效应对电场强度造成的影响几乎可以忽略不计, i 层厚度为 $4 \mu\text{m}$ 时二者区别明显。图 3(b) 为与图 3(a) 对应的频谱分布,可以看出当 i 层厚度越大时,干扰效应对频谱强度的影响越大,但是 i 层厚度对太赫兹脉冲中心频率的影响很小。这是由于超短激光泵浦 GaAs p-i-n 结构由光生载流子在有源区振荡产生太赫兹脉冲,由载流子振荡产生太赫兹脉冲的中心频率依赖于载流子的密度^[17]。在 GaAs p-i-n 结构表面激发浓度相同的情况下,当 i 层厚度改变时 i 层内载流子密度改变较小,因此 i 层厚度的变化对太赫兹脉冲的中心频率产生的影响并不明显。

由图 3 可知 GaAs p-i-n 结构 i 层的厚度与产生太赫兹脉冲参数以及干扰效应呈现出较为明显的相关性。为了探究太赫兹脉冲参数以及干扰效应的影响随

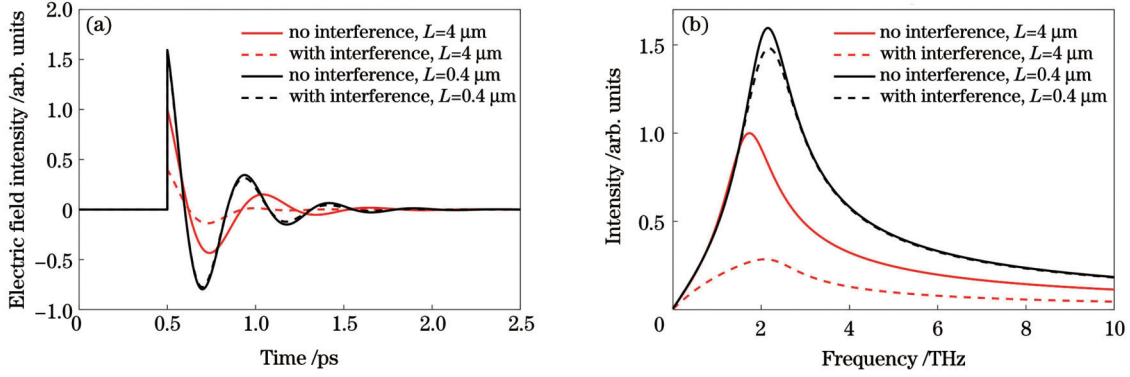


图3 不同*i*层厚度的GaAs p-i-n结构包含干扰效应与忽略干扰效应产生的太赫兹脉冲波形。(a)时域波形;(b)频谱
Fig. 3 Waveforms of terahertz pulses generated by GaAs p-i-n structures with different thicknesses of *i*-layer and with or without considering interference effect. (a) Time-domain waveforms; (b) corresponding frequency spectra

*i*层厚度的变化规律,在数值实验中将*i*层厚度从0.4 μm逐步增加至4 μm,详细计算了当表面激发浓度相同时不同*i*层厚度包含干扰效应与忽略干扰效应的情况下产生太赫兹脉冲的各项参数。图4(a)和图4(b)分别为*i*层厚度在0.4~4 μm范围内考虑干扰效应与忽略干扰效应产生的瞬态光电流峰值以及太赫兹电场强度峰值变化趋势。可以看出随着*i*层厚度的增加,即使泵浦激光注入到GaAs p-i-n结构的光子数目在增加,包含干扰效应与忽略干扰效应的电流峰值与电场强度峰值都在减小。在忽略干扰效应的情况

下,由于在数值模拟中设置了表面激发浓度相同以及载流子在*i*层表面到深处的衰减,随着*i*层厚度的增加平均载流子浓度就会降低,相应的电流峰值与电场强度峰值也在降低。在包含干扰效应的情况下,由于随着*i*层厚度的增加载流子分布的非均匀性在增加,干扰效应的影响也随之增加,因此电流峰值与电场强度峰值在减小。由于干扰效应会对GaAs p-i-n结构向外辐射太赫兹脉冲产生较大的影响,因此包含干扰效应时电流峰值与电场强度峰值下降得更快。

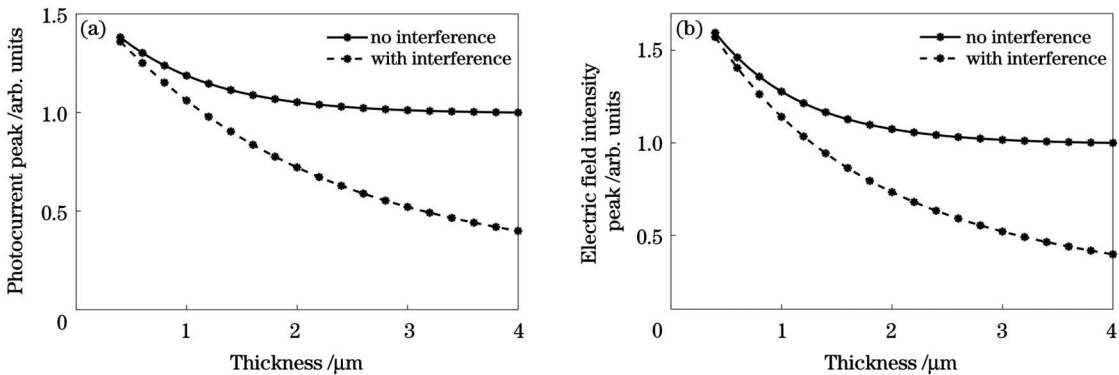


图4 *i*层厚度为0.4~4 μm的GaAs p-i-n结构考虑干扰效应与忽略干扰效应产生的瞬态光电流峰值及太赫兹电场强度峰值变化趋势。(a)瞬态光电流峰值变化趋势;(b)太赫兹电场强度峰值变化趋势
Fig. 4 Trends of photocurrent peak amplitude and terahertz electric field intensity peak amplitude with thickness of *i*-layer from 0.4 to 4 μm with or without considering interference effect. (a) Trends of photocurrent peak amplitude; (b) trends of terahertz electric field intensity peak amplitude

由上述分析可知,干扰效应会降低GaAs p-i-n结构产生太赫兹脉冲的强度,而且当*i*层厚度发生变化时,干扰效应产生的影响也会改变。为了定量研究*i*层厚度与干扰效应影响之间的关系,详细地计算了*i*层厚度在0.4~4 μm范围内包含干扰效应与忽略干扰效应产生的太赫兹脉冲能量变化,如图5(a)所示。

定义干扰效应影响因子 Q 来表征干扰效应影响着*i*层厚度的变化:

$$Q = \frac{P_o - P_w}{P_o} \times 100\%, \quad (10)$$

式中: P_o 和 P_w 分别为忽略干扰效应与含有干扰效应的太赫兹脉冲能量。

干扰效应影响因子计算结果如图5(b)所示。可以看出随着*i*层厚度的减小,产生的太赫兹脉冲能量在增加,同时干扰效应造成的影响在减小;当*i*层厚度为0.4 μm时,太赫兹脉冲能量达到最大值且干扰效应的影响达到最小值5.82%,因此可以通过减小*i*层厚度使得*i*层内载流子的浓度更高且分布更加均匀,从而达到减小干扰效应、增强太赫兹输出的目的。

由上述分析可知,当*i*层厚度改变时干扰效应造成

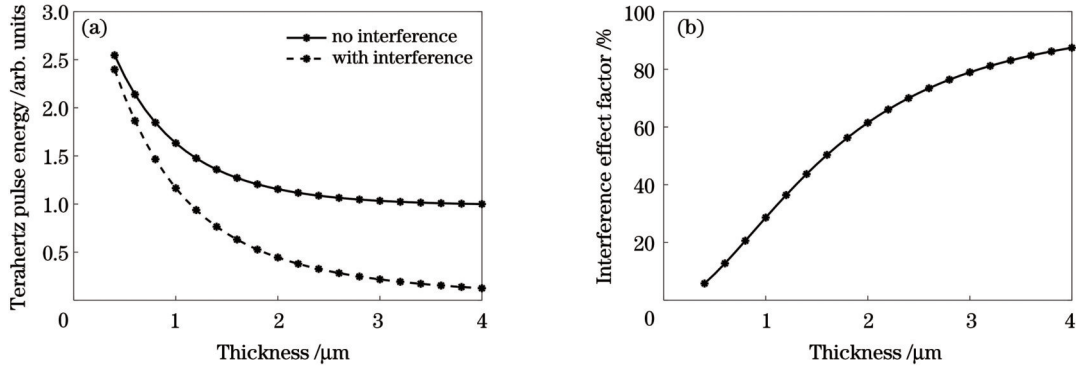


图5 不同*i*层厚度时干扰效应对太赫兹波产生的影响。(a) GaAs p-i-n结构考虑干扰效应与忽略干扰效应产生的太赫兹脉冲能量变化;(b)干扰效应影响因子变化

Fig. 5 Influence of interference effect on terahertz wave generation under different thicknesses of *i*-layer. (a) Change of terahertz pulse energy with or without considering interference effect; (b) change of interference effect factor

的影响也在改变。另外,干扰效应会使得不同*i*层厚度时产生的太赫兹脉冲宽度发生改变。为了描述*i*层厚度变化与太赫兹脉冲半高全宽(FWHM)变化之间的关系,计算了*i*层厚度在0.4~4 μm范围时产生的太赫兹脉冲半高全宽变化趋势,结果如图6所示。可以看出太赫兹脉冲的半高全宽随着*i*层厚度的增加而增加,这也意味着干扰效应的影响在随着*i*层厚度的增加而增加,与图5(b)显示的干扰效应影响因子变化趋势相符。有研究表明,当GaAs p-i-n结构*i*层厚度减小到0.4 μm以下时,由于内置电场的增强会导致电子密集转移到L谷,转移到L谷中的电子不会形成瞬态电流,因此对于GaAs p-i-n结构当*i*层厚度减小到0.4 μm以下时太赫兹输出会减少^[21]。如果消除GaAs p-i-n结构中干扰效应的影响,GaAs p-i-n结构将适合开发高效的太赫兹脉冲辐射源。

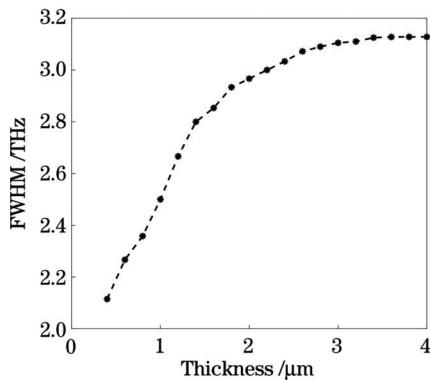


图6 *i*层厚度为0.4~4 μm的GaAs p-i-n结构包含干扰效应产生的太赫兹脉冲半高全宽变化趋势

Fig. 6 Trend of terahertz pulse full-width at half-maximum with thickness of *i*-layer from 0.4 to 4 μm with interference effect considered

当超短激光脉冲泵浦GaAs p-i-n结构时,由于*i*层表面与*n*层和*p*层费米能级之间的能量分离,在*n*层和*p*层内会存在方向相反的强电场并将*n*层和*p*层的电子束缚在势阱中。此时*n*层和*p*层的外源电子不能对

产生光电流做出贡献,太赫兹脉冲仅由*i*层内载流子输运过程产生。如果增加*n*层和*p*层的厚度,则将使得照射到*i*层的激光发生衰减从而降低太赫兹辐射强度,但该现象与干扰效应无关。

由于本征半导体与掺杂半导体材料形成的异质结对光生载流子的束缚有所不同,当超短激光泵浦GaAs p-i-n结构时,其本征半导体内部可形成快速振荡电流,无需偏置电场即可形成振荡的太赫兹脉冲辐射。注意到铁磁/非铁磁金属材料异质结结构由于两种材料内电子自旋不同,也可产生无需偏置电场的太赫兹脉冲辐射,该结构正逐步成为一种新型、成熟的太赫兹辐射源^[22-23]。以半导体材料为基底,并结合微纳加工技术与上述铁磁/非铁磁材料异质结结构,或许可构成太赫兹辐射阵列,从而构成大面积、大功率太赫兹辐射源。

4 结 论

在无偏置电场作用下超短激光脉冲泵浦GaAs p-i-n异质结结构产生太赫兹脉冲辐射的物理模型中,由于*n*层和*p*层的电子被束缚在势阱中无法形成快速振荡的光电流,因此该物理模型中光电流仅由*i*层内载流子输运产生。*i*层内光电流分布不均衡使得总的光电流受到不同厚度处电流的干扰,从而影响产生的太赫兹辐射。本文通过数值模拟和理论分析,研究了该结构中干扰效应对太赫兹辐射的影响以及*i*层厚度与干扰效应的定量关系。结果表明干扰效应会降低太赫兹辐射强度,而且当*i*层厚度增加时,干扰效应造成的影响及产生的太赫兹脉冲的半高全宽也随之增加。理论分析表明太赫兹脉冲是由*i*层中的载流子振荡产生的,因此太赫兹脉冲强度依赖于*i*层内载流子浓度。在表面载流子激发浓度相同的情况下,考虑到载流子从*i*层表面扩散到*i*层深处浓度的衰减,*i*层内的载流子浓度分布依赖于*i*层厚度,因此干扰效应与*i*层厚度呈现出相关性。基于数值实验和理论分析的结论与相关实

验^[17]和蒙特卡罗模拟的结果^[19]相近,从而证实了本文结论的有效性。研究结果将有助于认识干扰效应对 GaAs p-i-n 异质结构辐射太赫兹脉冲影响的机制,为开展相关实验提供理论指导,为半导体异质结元件产生太赫兹脉冲辐射提供新思路。

参 考 文 献

- [1] 谷建强, 王可蒙, 许祎, 等. 基于超材料的太赫兹光电导天线[J]. 中国激光, 2021, 48(19): 1914004.
Gu J Q, Wang K M, Xu Y, et al. Metamaterials-based terahertz photoconductive antennas[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(19): 1914004.
- [2] Ferguson B, Zhang X C. Materials for terahertz science and technology[J]. Nature Materials, 2002, 1(1): 26-33.
- [3] Ionin A A, Kinyaevskiy I O, Klimachev Y M, et al. NH_3 laser THz emission under optical pumping by “long” ($\sim 100 \mu\text{s}$) CO_2 laser pulses[J]. Chinese Optics Letters, 2023, 21(2): 023701.
- [4] Harter T, Ummethala S, Blaicher M, et al. Wireless THz link with optoelectronic transmitter and receiver[J]. Optica, 2019, 6(8): 1063-1070.
- [5] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology[J]. Nature Photonics, 2007, 1(2): 97-105.
- [6] Cai X D, Tang R, Zhou H Y, et al. Dynamically controlling terahertz wavefronts with cascaded metasurfaces[J]. Advanced Photonics, 2021, 3(3): 036003.
- [7] Zhang Y Y, Zhao J, Wang D Y, et al. Lensless Fourier-transform terahertz digital holography for real-time full-field phase imaging[J]. Photonics Research, 2022, 10(2): 323-331.
- [8] 韩张华, 孙开礼, 蔡阳健. 微纳光学结构与太赫兹辐射产生技术的研究进展[J]. 光学学报, 2021, 41(8): 0823017.
Han Z H, Sun K L, Cai Y J. Research progress of micro-nano optical structure and terahertz radiation generation technology[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(8): 0823017.
- [9] Yardimci N T, Jarrahi M. Nanostructure-enhanced photoconductive terahertz emission and detection[J]. Small, 2018, 14(44): 1802437.
- [10] Yang S H, Jarrahi M. Navigating terahertz spectrum via photomixing[J]. Optics and Photonics News, 2020, 31(7): 36-43.
- [11] Kawase K, Shikata J I, Imai K, et al. Transform-limited, narrow-linewidth, terahertz-wave parametric generator[J]. Applied Physics Letters, 2001, 78(19): 2819-2821.
- [12] Amirzhan A, Chevalier P, Rowlette J, et al. A quantum cascade laser-pumped molecular laser tunable over 1 THz[J]. APL Photonics, 2022, 7(1): 016107.
- [13] Curwen C A, Reno J L, Williams B S. Terahertz quantum cascade VECSEL with watt-level output power[J]. Applied Physics Letters, 2018, 113(1): 011104.
- [14] Sammon M, Zudov M A, Shklovskii B I. Mobility and quantum mobility of modern GaAs/AlGaAs heterostructures[J]. Physical Review Materials, 2018, 2(6): 064604.
- [15] Hwang J S, Lin H C, Lin K I. Terahertz radiation from InAlAs and GaAs surface intrinsic- N^+ structures and the critical electric fields of semiconductors[J]. Applied Physics Letters, 2005, 87(12): 121107.
- [16] Reklaitis A. Coherence of terahertz emission from photoexcited electron-hole plasma: hydrodynamic model and Monte Carlo simulations[J]. Physical Review B, 2008, 77(15): 153309.
- [17] Kersting R, Unterrainer K, Strasser G, et al. Few-cycle THz emission from cold plasma oscillations[J]. Physical Review Letters, 1997, 79(16): 3038-3041.
- [18] 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.
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 Sinica, 2022, 51(7): 0751403.
- [19] Reklaitis A. Monte Carlo analysis of terahertz oscillations of photoexcited carriers in GaAs p-i-n structures[J]. Physical Review B, 2006, 74(16): 165305.
- [20] Reklaitis A. Crossover between surface field and photo-Dember effect induced terahertz emission[J]. Journal of Applied Physics, 2011, 109(8): 083108.
- [21] Kersting R, Heyman J N, Strasser G, et al. Coherent plasmons in n-doped GaAs[J]. Physical Review B, 1998, 58(8): 4553-4559.
- [22] 金钻明, 宋邦菊, 李炬庚, 等. 基于超快电子自旋动力学的太赫兹辐射研究进展[J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0508005.
Jin Z M, Song B J, Li J G, et al. Research progress of terahertz radiation based on ultrafast electron spin dynamics[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0508005.
- [23] Wu W P, Ameyaw C Y, Doty M F, et al. Principles of spintronic THz emitters[J]. Journal of Applied Physics, 2021, 130(9): 091101.

Influence and Optimization of Interference Effect in GaAs p-i-n Structure on Terahertz Wave Generation

Sun Changming¹, Li Qiangshuang¹, Wang Jingyi¹, Du Haiwei^{1,2*}

¹School of Measuring and Optical Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, Jiangxi, China;

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

Abstract

Objective Terahertz wave refers to the electromagnetic wave whose frequency is in the range of 0.1–10 THz ($1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$) and the wavelength range is 30–3000 μm . The terahertz band is located in the transition region between the electronic and optical bands in the entire electromagnetic spectrum, and is also known as the “terahertz gap” because the research on the terahertz band develops more slowly than those on the electronic and optical bands. Because of its special frequency range, terahertz wave has the characteristics of low photon energy, wide band and high penetration. These excellent characteristics make the terahertz wave have huge applications in the fields of nondestructive testing, communication, spectroscopy, and biomedical imaging. High power broadband terahertz radiation source is the important basis of the practical applications of terahertz wave, so it is of great practical significance to improve the power and bandwidth of terahertz radiation source. At present, photoconductor antenna based on the GaAs

semiconductor has been a mature terahertz radiation source. Moreover, some materials pumped by ultrashort laser pulses also can generate broadband terahertz radiation from their surface without the biased electric field. The heterojunction of the semiconductor also can generate broadband terahertz radiation from the surface, such as GaAs p-i-n heterojunction structure. In this paper, the mechanism of terahertz generation from the GaAs p-i-n structure pumped by ultrashort laser pulses is studied. The influence of the interference effect in this process on the terahertz yield and its optimization are discussed based on numerical calculations.

Methods Based on the physical model of terahertz radiation generated by the ultrashort laser pumped GaAs p-i-n heterojunction structure, the influence of the interference effect on the terahertz generation is investigated with numerical calculations, and the mechanism of the interference effect is revealed. The influence of the interference effect on terahertz radiation with different thicknesses of i-layer is simulated, and then the correlation between the i-layer thickness and the interference effect is revealed. It is found that this effect is caused by the incoherent oscillations of the plasma which has an uneven distribution of carriers in the i-layer of the GaAs p-i-n structure. The total photocurrent decreases due to the different phase and direction of the photocurrent oscillations in different regions of the i-layer, thus decreasing the intensity of terahertz radiation. By reducing the thickness of i-layer to a certain range, the carrier distribution in the i-layer becomes homogeneous, thus optimizing the influence of interference effect on terahertz generation.

Results and Discussions Through numerical calculations, the transient photocurrents generated by the GaAs p-i-n structures with thickness from 0.4 to 4 μm respectively with and without the interference effect are obtained (Fig. 2). The transient photocurrent is a sub-picosecond oscillating current, and its corresponding electromagnetic radiation spectrum is located in the terahertz band. The time-domain waveforms of the terahertz electric field generated from different conditions are calculated, and their frequency spectra are obtained through Fourier transform (Fig. 3). By the numerical experiments, the parameters of terahertz pulse with the thickness of i-layer from 0.4 to 4 μm are given in detail, and an influence factor of the interference effect is defined by the ratio of the terahertz pulse energy loss caused by the interference effect to the terahertz pulse energy without the interference effect (Figs. 4 and 5). By decreasing the thickness of i-layer with the interference effect, the variation trend of the full-width at half-maximum (FWHM) of terahertz pulse is presented (Fig. 6). When the thickness of i-layer decreases in the range of 0.4–4 μm , the influence of interference effect decreases gradually due to the more inhomogeneous distribution of carriers. The FWHM decreases slightly with the decrease of interference effect, and the time-domain peak value and the pulse energy of terahertz pulse increase significantly. Therefore, the influence of interference effect can be optimized by reducing the thickness of i-layer, consequently improving the terahertz intensity.

Conclusions In summary, this paper reveals the physical mechanism of the interference effect causing the significant reduction of the terahertz radiation of GaAs p-i-n heterojunction structure pumped by ultrashort laser pulses. By comparing the terahertz pulse parameters with and without the interference effect, it is found that the terahertz intensity can be improved by reducing the influence of the interference effect. By comparing the influence of interference effect under different thicknesses of i-layer, the correlation between the thickness of i-layer and the interference effect is revealed. The influence of interference effect can be optimized by reducing the thickness of i-layer, which will increase the terahertz intensity. This work may provide a new way to develop high-power broadband terahertz radiation source with GaAs p-i-n heterojunction structure, and provide a good theoretical reference for the related experiments.

Key words terahertz technology; GaAs; p-i-n heterojunction structure; interference effect