

半导体中相干亚毫米波的产生和传播

李 明

(国家自然科学基金委员会信息科学部, 北京 100083)

孙凤国

(国防科学技术大学应用物理系, 长沙 410003)

X. C. Zhang

(Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY 12180, U. S. A.)

摘 要 研究了超短光脉冲在 GaAs 表面激发相干亚毫米波振幅随入射角变化的规律, 前后向辐射比值随入射角度变化的规律, 实验测量了在 GaAs 表面镀上极薄金属薄膜后所产生的相干亚毫米波振幅对薄膜厚度的依赖关系; 利用光生载流子偶极辐射的理论模型成功地解释了实验得到的角度依赖关系和相干亚毫米波的偏振特性。

关键词 相干亚毫米波, 偶极辐射。

1 引 言

近年来, 用超短光脉冲在半导体表面激发相干亚毫米波引起人们广泛的注意^[1~5]。当超短光脉冲照射到半导体表面时, 半导体将辐射出相干亚毫米电磁脉冲, 这种相干亚毫米电磁脉冲的脉宽约为 1 ps。一般认为其产生的机制有两种, 光生载流子辐射和光整流^[6]。前者指超短光脉冲激发出光生载流子, 它们在半导体表面电场的作用下加速运动, 从而辐射出相干亚毫米电磁脉冲; 后者指超短光脉冲的半导体非线性效应作用下自差频产生相干亚毫米电磁脉冲。两种机制作用的强弱取决于材料本身的性质及入射光脉冲光子能量的大小等因素。研究亚毫米电磁辐射不仅可以得到关于半导体材料物理性质的大量信息, 同时亚毫米电磁辐射本身也提供了研究材料的新手段。

本文讨论的内容是基于光生载流子产生电磁辐射的机制。这种机制产生的相干亚毫米波的辐射沿光波透射(前向)和反射(后向)两个方向。它们的传波方向遵从斯涅耳(Snell)定律。

2 实验原理及装置

图 1 给出了用于测量相干亚毫米电磁脉冲的实验装置, Mira900 锁模钛宝石激光器产生实验所需要的超短光脉冲, 它由一台 INNOVR300 氩离子激光器泵浦。所产生的超短光脉冲脉宽为 150 fs, 重复频率为 76 MHz, 平均输出功率为 800 mW, 波长 810 nm。自钛宝石激光

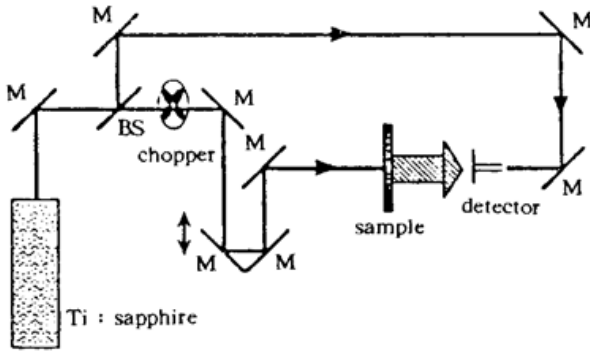


Fig. 1 Experimental setup for generation and measurement of coherent submillimeter wave

器输出的激光被分成两束，较强的一束照射在 GaAs 样品上，以激发亚毫米电磁波。较弱的一束（功率约 40 mW）经过一定的时间延迟照射在用于探测相干亚毫米电磁脉冲的 Grischowsky 天线上作为开关天线的门脉冲。Grischowsky 天线的特点是只有在门脉冲激光照射期间产生光生载流子而导通并探测到相干亚毫米电磁脉冲，这样由于门脉冲激光脉宽(150 fs)远小于电磁脉冲的宽度(1 ps)，不同时间延迟取得的测量值即构成电磁脉冲时间域的波形，从而实现了对电磁脉冲的采样。实验中采用硅透镜会聚亚毫米波到 Grischowsky 天线上，提高探测的灵敏度。

3 实验结果

被探测到的亚毫米波振幅不仅与材料产生亚毫米波的效率有关，而且与实验中光路的准直，探测器的灵敏度等都有关系。对本文研究的问题而言以任意单位表达亚毫米波振幅是合适而方便的。图 2 给出了测量的前向相干亚毫米波振幅随激光入射角度的变化，以及与后面理论计算结果的比较。相干亚毫米波振幅随激光入射角度的增加而增加，直到 74°突然下降。图 3 是测量前后向辐射比值随入射角度的变化，从中可以看出在 45°入射情况下前向辐射幅度仅为后向辐射的一半左右，随激光入射角度的增加在 72°左右二者的比值约为 1。后向辐射的测量要用不同的光路，因此要对入射到样品表面的功率仔细测量，以校正最后的实验结果。

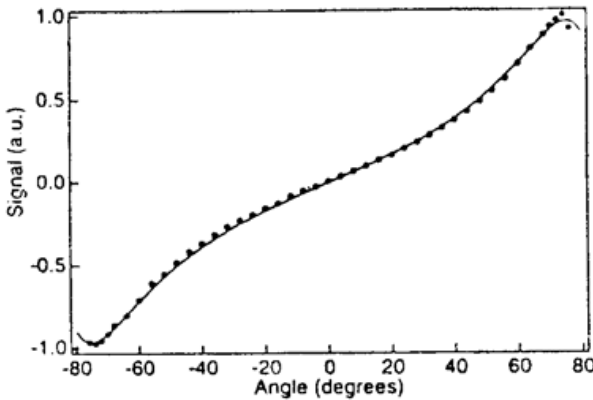


Fig. 2 Forward coherent submillimeter wave amplitude vs. incident angle

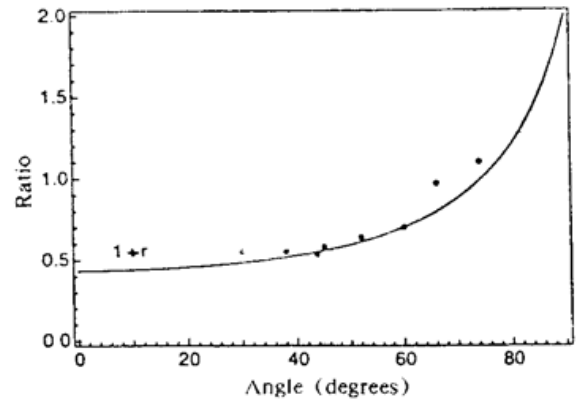


Fig. 3 The ratio of the forward and the backward coherent waves vs. the optical incident angle

根据后面的理论分析，如果用可以透过 810 nm 红外激光，但反射亚毫米电磁波的导电薄膜将后向辐射反射后迭加在前向辐射上，将把相干亚毫米波放大。实验上采用一种被称为 ITO(Indium Tin Oxide)的导电薄膜实现这种功能，并观察到了亚毫米波的放大。图 4 示意地给出了在这个实验中相干亚毫米波的放大，实验结果指出应用 ITO 后前向亚毫米波振幅增加近 40%。

实验测量了在 GaAs 表面镀上极薄金属薄膜后所产生的相干亚毫米波振幅对薄膜厚度的依赖关系，其实验结果如图 5 所示，从中可以看到相干亚毫米波振幅随薄膜厚度的增加而增加。

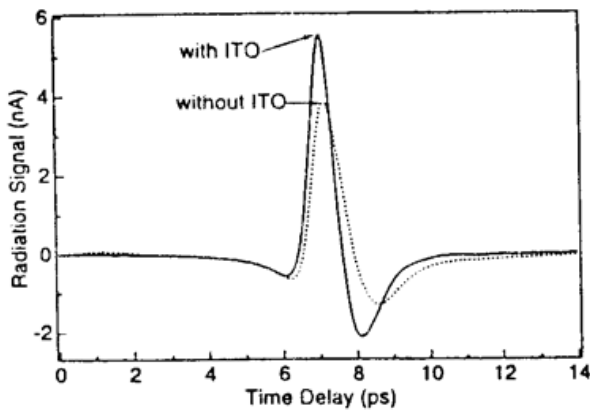


Fig. 4 Amplification of coherent submillimeter wave by applying the ITO film

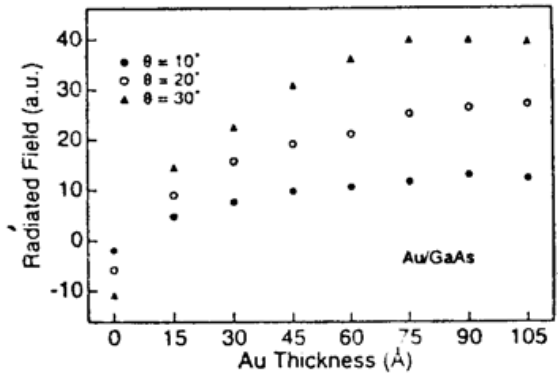


Fig. 5 Amplitude of submillimeter wave vs. thickness of the metal film

4 理论模型及分析

前面已经指出人们早已认识到光生载流子在半导体表面电场中运动是产生亚毫米辐射的基本机制之一,在这一图象的基础上,建立定量的理论模型与实验进行比较无疑将对理解亚毫米辐射的产生有重要的意义,然而至今为止尚未有令人满意的定量的模型。本文应用亚毫米辐射的偶极子模型成功地解释了实验中得到的相干亚毫米波振幅和前后向辐射比值随激光入射角度变化的规律,相干亚毫米波随样品表面所镀金属薄膜厚度变化的规律等。

如果超短光脉冲以角度 θ 入射到半导体表面,那么相干亚毫米振幅遵从斯涅耳(Snell)定律^[7],形成前向透射束和后向反射束。光生载流子在表面电场中垂直于表面运动,可以认为它们形成了一些垂直于表面的偶极子。在均匀介质中,偶极辐射电场可写为:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon c^2 r^2} \mathbf{r} \times (\mathbf{r} \times \frac{\partial \mathbf{J}}{\partial t}) \quad (1)$$

如果认为这些偶极子处于半导体内则亚毫米辐射的强度应由下式表达

$$E(\theta) = A T(\theta) t(\theta) \sin \theta \quad (2)$$

其中因子 $T(\theta)$ 体现了耦合到半导体中的光能量随入射角度的变化, $T(\theta)$ 为光强透射率, $\sin \theta$ 体现了偶极子辐射的空间分布特性, $t(\theta)$ 为亚毫米辐射自半导体中透射出来的系数。 A 为一与探测器灵敏度、亚毫米辐射的产生效率、亚毫米辐射聚焦的条件等有关的常数。这样根据(2)式,前向透射束和后向反射束的比值将等于 1,与激光入射角度无关。实验的结果是前向透射束和后向反射束的比值随入射角度的增大而增大。其实这一事实恰好说明了偶极子不是处于半导体内部,而是仅存在于半导体表面。图 6 是对偶极子产生的亚毫米波偏振性的分析。小箭头为偏振方向(由(1)式给出),大箭头表示电荷移动方向即偶极子方向。由于偶极子非常靠近半导体表面,观测到的前向透射束实际上是两束亚毫米辐射 a 与 b 的迭加。由上面(1)式表达, b 则是由 c 在表面 1 上反射形成的,从偶极子辐射的偏振特性以及电矢量在表面上满足的边界条件,可知观测到的前向透射束的强度为

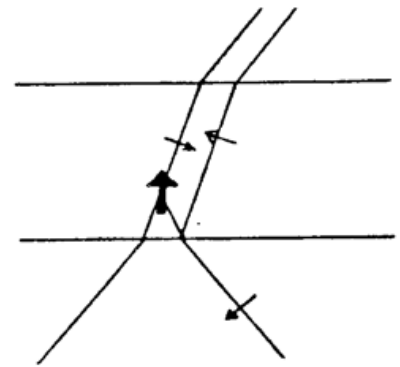


Fig. 6 Analysis of polarity of dipole radiation

小箭头为偏振方向(由(1)式给出),大箭头表示电荷移动方向即偶极子方向。由于偶极子非常靠近半导体表面,观测到的前向透射束实际上是两束亚毫米辐射 a 与 b 的迭加。由上面(1)式表达, b 则是由 c 在表面 1 上反射形成的,从偶极子辐射的偏振特性以及电矢量在表面上满足的边界条件,可知观测到的前向透射束的强度为

$$E = AT(\theta)(1 + r(\theta))t(\theta) \sin \theta \quad (3)$$

式中 $r(\theta)$ 为表面对亚毫米波的反射率。由于半导体对近红外光的吸收长度小于 $1 \mu\text{m}$, 偶极子距离表面很近, 因而可以忽略反射引起的延时作用。这样就得到了透射束强度随入射角度的变化规律。从图 2 看到计算值与实验值符合极好。计算中 $T(\theta)$, $r(\theta)$, $t(\theta)$ 均由菲涅尔公式表达, 取 GaAs 折射率为 3.6。在小角度入射时, 表面对相干亚毫米波的反射率为负值。后向相干亚毫米波的强度则仍由(1)式给出, 透射束与反射束的比即为

$$R(\theta) = 1 + r(\theta) \quad (4)$$

图 3 给出了这一比值的理论值和实验值, 二者符合很好。在布儒斯特角的反射率变为 0, 透射束和反射束的比值为 1。

从本文的理论分析很容易理解有 ITO 薄膜或金属薄膜的实验结果, 虽然在 GaAs 表面放有 ITO 或镀上金属薄膜后使红外激光进入到 GaAs 中的能量有所降低, 但金属薄膜却将后向亚毫米波反射与前向辐射相干迭加, (由于半波损失与前面讨论的半导体表面的反射不同) 并且后面这种效应在一定的薄膜厚度范围内随薄膜厚度增加的上升超过了前者随薄膜厚度增加的下降, 这就导致在一定的薄膜厚度范围内前向辐射随薄膜厚度的增加而增加。

结 论 本文对超短光脉冲在 GaAs 表面激发相干亚毫米波振幅随入射角度变化的规律, 前后向辐射比值随入射角度变化的规律进行了研究, 文中还得到了在 GaAs 表面镀上极薄金属薄膜后所产生的相干亚毫米波振幅对薄膜厚度的依赖关系; 并应用光生载流子偶极辐射的理论模型成功地解释了实验得到的角度依赖关系和相干亚毫米波的偏振特性。这一研究表明光生载流子偶极辐射的理论模型是一相当成功的理论模型。研究的结果对发展取得更强的相干亚毫米辐射的方法有意义。

感谢美国 Rensselaer 综合技术学院 G. A. Wagoner 先生的帮助。感谢中国国家自然科学基金委员会练永宁教授、中国科学院物理所许祖彦教授给予的热情支持。

参 考 文 献

- [1] X. C. Zhang, B. B. Hu, J. T. Darrow *et al.*, Generation of femtosecond electromagnetic pulses from semiconductor surfaces. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(11): 1011~1013
- [2] K. Victor, H. G. Roskos, C. Wasejke, Efficiency of submillimeter-wave generation and amplification by coherent wave-packet oscillations in semiconductor structures. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1994, **11**(12): 2470~2479
- [3] Brener, P. C. M. Planken, M. C. Nuss, *et al.*, Coherent control of terahertz emission and carrier populations in semiconductor heterostructures. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1994, **11**(12): 2457~2469
- [4] M. Exter, D. Grischowsky, Optical and electronic properties of doped silicon from 0.1 to 2 THz. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(17): 1695~1696
- [5] R. H. M. Groeneveld, D. Grischowsky, Picosecond time-resolved far-infrared experiments on carriers and excitons in GaAs-AlGaAs multiple quantum wells. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1994, **11**(12): 2502~2507
- [6] X. F. Ma, X. C. Zhang, Determination of ratios between nonlinear-optical coefficients by using subpicosecond optical rectification. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1993, **10**(7): 1175~1179
- [7] J. D. 杰克逊, 朱培豫译, 经典电动力学. 北京, 人民教育出版社, 1978: 306~310

Generation and Propagation of Coherent Sub-Millimeter Wave from Semicoductors

Li Ming

(Directorate for Information Sciences, National Science Foundation of China, Beijing 100083)

Sun Fengguo

*(Department of Applied Physics, The University of Defencing Science and Technology of China,
Changsha 410003)*

X. C. Zhang

(Department of Physics, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY 12180, U. S. A.)

(Received 25 February 1995)

Abstract The coherent submillimeter wave generated from the GaAs surface excited by ultrashort optical pulses is incident-angle dependent and the ratio of forward and backward radiation is related with the optical incident angle. The relationship between the thickness of the metal film coated on GaAs surface and the amplitude of submillimeter wave are measured. The theoretical model of the photon carrier dipole gives a well explanation on the angle dependent relationship and the polarization of the coherent submillimeter wave.

Key words coherent submillimeter wave, dipole radiation.