光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023110803

4H-SiC光导开关性能的仿真研究

蓝华英[1]，罗尧天[2]，崔海娟[1*]，肖建平[2]，孙久勋[1]

（1. 电子科技大学 物理学院，成都 611731；2. 四川省宽带微波电路高密度集成工程研究中心，成都 610036）

摘　要： 碳化硅光导开关是相关领域的研究热点，但是文献中对4H-SiC光导开关的理论研究仍然以集总元件模型为主，仅能给出定性结果，典型文献中瞬态条件下的实验数据还没有定量的理论解释。文章使用Silvaco TCAD软件中的器件-电路混合模式，结合自编的载流子迁移率接口程序，对4H-SiC光导开关的光学电学特性进行模拟仿真。单脉冲响应的仿真结果表明，器件在瞬态条件下的峰值光电流随光能的变化与文献中的实验数据相符合，表明所用模型和参数具有合理性。对影响单脉冲响应的主要因素，包括脉冲能量、脉冲宽度、碳化硅厚度，进行了计算和分析。同时，针对两种碳化硅厚度的器件，进行了多脉冲串响应的计算和分析。文章得到的结果和结论对碳化硅光导开关的进一步研究具有较好的参考价值。

关键词： 4H-SiC；光导开关；Silvaco TCAD；仿真模型

中图分类号： TN252　**文章编号：** 1001－5868(2024)02－0195－05

4H-SiC Photoconductive Switch Performance Simulation Research

LAN Huaying[1], LUO Yaotian[2], CUI Haijuan[1], XIAO Jianping[2], SUN Jiuxun[1]

(1. School of Physical Electronics; 2. Sichuan Province Engineering Research Center for Broadband Microwave Circuit High Density Integration, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, CHN)

Abstract: SiC PCSS is a research hot spot in related fields. However, theoretical research on 4H-SiC PCSS in the literature is still based on lumped element models that can only provide qualitative results. A quantitative explanation of the experimental data under transient conditions in typical literature is still lacking. This study uses the device-circuit hybrid mode in Silvaco TCAD software to simulate the optical and electrical characteristics of the 4H-SiC PCSS combined with a self-written carrier mobility interface program. The simulated results of the single pulse response show that the variation in the peak photocurrent of the device with optical energy is in good agreement with the experimental data under transient conditions reported in the literature, indicating that the model and parameters used are reasonable. The study also calculates and analyzes the main factors that affect the single pulse response, including the pulse energy, pulse width, and silicon carbide thickness. The multi-pulse responses of the devices for the two 4H-SiC thicknesses are calculated and analyzed. The results and conclusions obtained in this study provide a good reference for further research on SiC PCSS.

Key words: 4H-SiC; photoconductive switch(PCSS); Silvaco TCAD; simulation model

收稿日期：2023－11－08.

基金项目：四川省宽带微波电路高密度集成工程研究项目(220400).

* **通信作者：**崔海娟

0 引言

光导开关在太赫兹技术、超宽带技术、快速响应和高功率微波等领域有着广阔的应用前景[1-4]，多年来一直受到研究人员的重点关注。基于砷化镓材料的光导开关是前些年的研究热点，其在低偏压下工作在线性模式，在高偏压下工作在非线性模式[5-6]。工作在非线性模式下的砷化镓光导开关能够显著增强电脉冲幅值，并显著提高输出效率[7-8]。然而，由于砷化镓材料的耐压能力较弱，其应用范围受到一定限制。相较于砷化镓材料，碳化硅材料具有禁带宽度大、击穿场强高、热导率高以及饱和电子速率快等优点[9-11]，成为新一代光导开关的研究热点。

文献[12]用 6H-SiC 材料制作并测试了圆柱结构光导开关，并建立一种唯象模型来分析实验数据。该唯象模型[12]未区分电子和空穴，将光照产生的载流子总浓度 $n(t)$ 表示为：

$$n(t)=\int_{-\infty}^{t}G(s)\exp[(s-t)/\tau_r]\mathrm{d}s \quad (1)$$

$$G(t)=(\eta/\hbar dA)(1-r)(1-\mathrm{e}^{-2\alpha d})P(t) \quad (2)$$

式中，$G(t)$ 是光产生率，τ_r 是非平衡载流子复合时间，η 是材料的量子效率，α 是光吸收系数，d 是碳化硅厚度，A 是光照面积。$P(t)$ 是以瓦为单位的光脉冲功率，可表示为：

$$P(t)=P_0\exp\{-[(t-t_p)/t_r]^2\} \quad (3)$$

式中，P_0 是脉冲峰值功率，t_p 是脉冲中心，t_r 是脉冲宽度。光导开关的电阻表示为 $R(t)=d/(qn\mu A)$，迁移率 μ 直接取为与电场无关的常数。

采用唯象模型仅能定性描述光导开关的实验数据[12]，不能考虑许多重要的物理效应，比如载流子复合、光吸收的实际特性、强场下与电场相关的迁移率模型，以及杂质对开关的影响等。文献中大多数理论模型[12-15]都是在方程(1～3)的基础上，结合等效电路模型和理论推导进行各种改进，因此不能定量解释文献中的实验数据。

Silvaco TCAD 是进行半导体器件设计和仿真的流行软件，文献[13]用 Silvaco TCAD 软件对碳化硅光导开关进行了稳态仿真，但是尚未实现瞬态仿真，其瞬态仿真仍然采用唯象模型[13]。这是因为用 Silvaco TCAD 软件进行光导开关的瞬态仿真需要考虑器件的实际条件，涉及多种物理因素，包括实际的光脉冲、与电场有关的非线性迁移率公式、碰撞电离效应等。考虑这些因素以后，仿真很容易发散。

本论文利用 Silvaco TCAD 软件提供的 C 语言接口[16]，根据文献[15,17]中的 4H-SiC 强场迁移率公式编写了接口程序，对文献[12]中的光导开关进行仿真。考虑到开关在实际工作条件下的输出特性不仅取决于其自身性能，还和工作电路密切相关，本文将光导开关与工作电路相结合，采用器件-电路混合模式进行二维建模瞬态仿真。仿真得到的峰值电流-光能曲线与文献[12]中的实验数据符合得很好，并对影响单脉冲响应的主要因素，以及两种碳化硅厚度的多脉冲串响应进行了计算和分析。这对于碳化硅光导开关的进一步研究具有重要意义。

1 开关模型及其参数

文献[12]的 SiC 光导开关采用如图 1 所示垂直结构，其衬底尺寸为 10 mm×10 mm×0.8 mm。在二维建模过程中，本文设置相同尺寸的衬底厚度和底边长度，且光照面积与开关窗口面积一致。

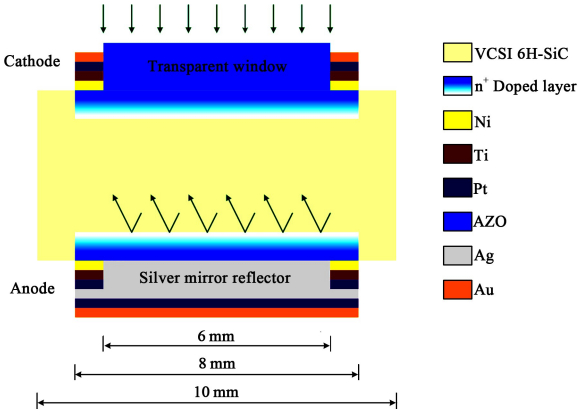


图 1 垂直结构光导开关示意图[12]

仿真电路如图 2 所示，开关的阳极限流电阻 R_f 连接电源 U_0，阴极和负载 R_L 相连。开关由波长为 532 nm 的脉冲激光触发。未加光脉冲时，开关处于关断状态，电源对电容进行充电；施加光脉冲时，开关进入导通状态，电容放电，在负载 R_L 上形成电脉冲。在仿真过程中，根据文献[12]电路参数取值如下：$R_f=1$ MΩ，$C=1$ nF，$R_L=33$ Ω，$U_0=2,4,6,8,10$ kV。

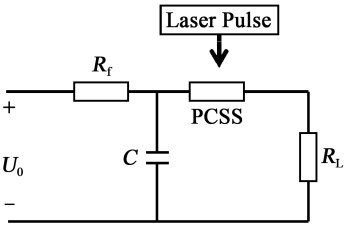


图 2 瞬态电脉冲仿真电路

混合仿真中考虑了 Auger 复合模型、Shockley-Read-Hall(SRH)复合模型、不完全电离模型、碰撞电离模型以及与电场相关的迁移率模型。模型的详细描述参见 Silvaco TCAD 软件手册[16]。

仿真中使用强场下的电子和空穴漂移速度模型[16-17]描述 4H-SiC 材料的迁移率，电子和空穴的漂移速度 v_n 和 v_p 分别表示为：

$$v_n(F)=\frac{\mu_1 F+\mu_0 F(F/F_0)^{\theta}+v_{sat}(F/F_1)^{\eta}}{1+(F/F_0)^{\theta}+(F/F_1)^{\eta}} \tag{4}$$

$$v_p(F)=1\,200Z^4-4\,100Z^3+5\,200Z^2-16\,000Z-47\,000 \tag{5}$$

$$Z=\frac{F-8.2\times10^6}{5.9\times10^6} \tag{6}$$

式中，F 是电场强度，单位为 V/m，$F_1=2.8\times10^7$ V/m，$F_0=3.05\times10^6$ V/m，$\mu_0=4\times10^{-3}$ m^2/Vs，$\mu_1=0.68\times10^{-3}$ m^2/Vs，$\eta=3$，$v_{sat}=2.413\times10^7$ m/s，$\theta=-1.95$。迁移率由下式计算：

$$\mu(F)=v(F)/F \tag{7}$$

仿真中的光脉冲 I 为高斯脉冲，由下式给出：

$$I(t)=\frac{E_0}{S\tau\sqrt{2\pi}}e^{\frac{-(t-t_0)^2}{2\tau^2}} \tag{8}$$

式中，$I(t)$表示光强，E_0 表示光脉冲总能量，S 表示光照面积，τ 表示光脉冲半峰值宽度。本文的脉冲表达式(8)不同于文献[12]中的方程(3)，方程(8)考虑了脉冲的实际条件，从而使本文仿真的结果可以与实验数据进行定量比较。

表 1 给出了模型的具体参数。其中 AUGN 和 AUGP 分别表示电子和空穴俄歇系数，TAUN 和 TAUP 分别表示电子和空穴寿命。

表 1　4H-SiC 光导开关模型的计算参数

参数	值
相对介电常数	9.66
光学折射率实部	2.6
光学折射率虚部	8×10^{-7}
禁带宽度 E_g/eV	3.24
AUGN/(cm^6/s)[18]	5×10^{-31}
AUGP/(cm^6/s)[18]	2×10^{-31}
TAUN/s	1×10^{-10}
TAUP/s	1×10^{-10}

此外，模型中通过调用陷阱掺杂语句考虑钒掺杂的作用[19-20]，假设掺杂浓度为 10^{17} cm^{-3}，深受主能级为 0.82 eV，深施主能级为 1.6 eV，电子捕获横截面积为 10^{-15} cm^2。

2　开关模型及其参数

2.1　模型参数的影响

下面分析光能对电脉冲响应时间的影响，并研究光导开关的响应特性。图 3 所示为电源电压 $U_0=2$ kV，脉冲宽度 τ 为 1.0 ns，能量 E_0 取三个典型数值 5，10，20 mJ 时的光脉冲和电流脉冲。由图可见，在光脉冲的激励下，开关迅速响应，形成电脉冲；电脉冲上升沿和光脉冲上升沿保持一致，但由于光生载流子的产生、复合需要一定的时间，电脉冲下降沿相对于光脉冲会有一定的展宽，同时电脉冲相对于光脉冲也有一定延迟。波形时延的原因可能是载流子在开关正负极之间运动，形成微小的等效电容，从而导致波形的时延。如图 4 所示，随着光能的增加，电脉冲峰值出现的时刻也略有提前，即开关的响应时间逐渐缩短。因此推测增大激励光脉冲能量能够在一定程度上提高开关的响应速度。

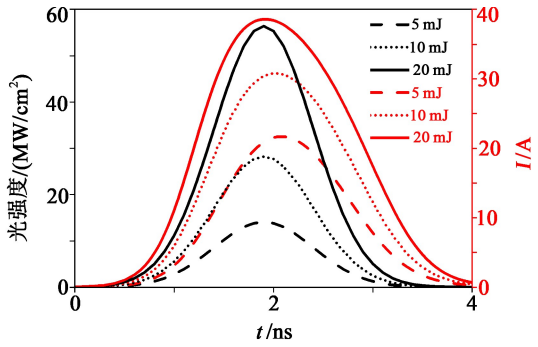


图 3　能量为 5，10，20 mJ 的光脉冲(黑色)及其响应电脉冲(红色)曲线

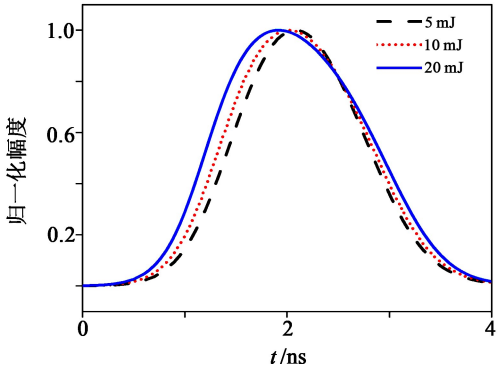


图 4　三种能量的电脉冲归一化幅度对比

图 5 所示为保持电源电压 $U_0=2$ kV，光能 E_0 为 10 mJ，脉冲宽度 τ 取三个典型数值 8，14，20 ns 时的光脉冲和电流脉冲。由图 5 可见，随着光脉冲脉宽的增大，电脉冲的展宽程度会随之增加。

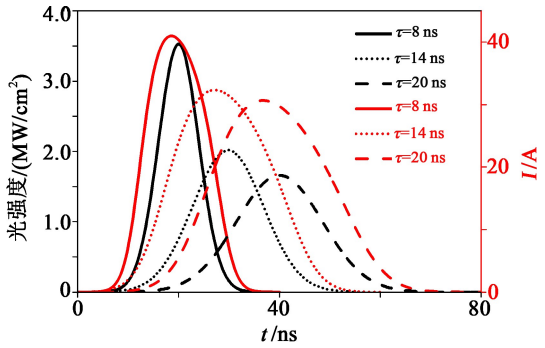


图 5 脉宽分别为 8,14,20 ns 的光脉冲(黑色)及其响应电脉冲(红色)曲线

图 6 所示为保持电源电压 $U_0=2$ kV、脉冲宽度 τ 为 1.0 ns 不变,碳化硅厚度分别取 0.2,0.4,0.8 mm 时的归一化电脉冲波形。由图 6 可见,随着碳化硅厚度的增加,电脉冲的上升沿几乎不变,即光导开关的响应速度不会改变,但是电脉冲的下降沿变陡,脉宽有一定幅度的减小。

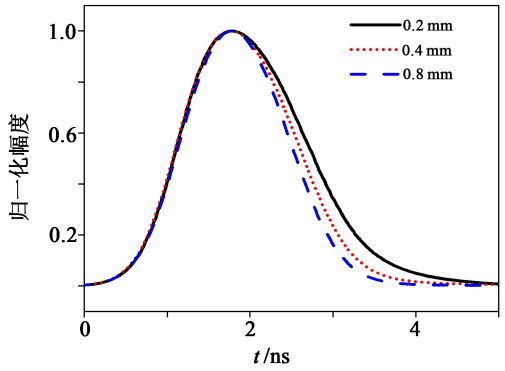


图 6 碳化硅厚度分别为 0.2,0.4,0.8 mm 条件下,电脉冲归一化幅度对比

2.2 饱和光能特性

文献[12]给出了不同偏压下峰值电流随光能变化的实验数据,但是到目前为止还没有理论研究对这些实验结果进行定量解释。为此,本文结合文献[12]的实验条件,针对这些实验数据进行仿真。在仿真过程中,电源电压 U_0 分别取 2,4,6,8 和 10 kV,光脉冲的脉宽为 8.5 ns,依次改变激励光脉冲能量 E_0,得到如图 7 所示开关输出光电流峰值随激励光能变化的仿真曲线。

如图 7 所示,在 4～40 mJ 脉冲能量范围内,5 条仿真曲线都和文献[12]的实验数据符合得很好。这表明本文采用的碳化硅迁移率模型和仿真模型是合理的,得出的相关仿真结果是可靠的。从图 7 可以看出,在固定偏压下,输出光脉冲的电流随着激励光能的增加,逐渐增加并达到饱和。这是由于 4H-SiC 光导开关工作在线性模式下,V 掺杂引入的中间能级使开关在 532 nm 激光激励下导通,随着光脉冲能量增加,光生载流子的浓度逐渐增大并趋于饱和。在固定偏压下,光电流和光生载流子浓度成正比,因此光电流随光能增加逐渐出现饱和现象。

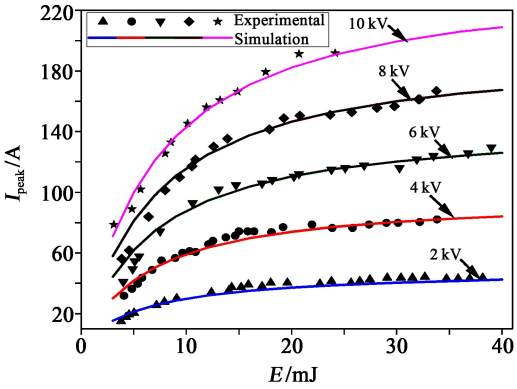


图 7 在 2,4,6,8,10 kV 偏压下峰值电流随光能的仿真曲线与实验数据[12]的比较

2.3 连续脉冲响应仿真

由于实际工作中通常会涉及多脉冲的情况,本文对 4 个光脉冲串的响应进行了仿真。仿真的电路参数和前面相同,但是碳化硅厚度分别取 0.4 和 0.8 mm,工作偏压为 1 kV,每个脉冲的能量为 1 mJ,脉宽为 0.5 ns,脉冲间隔为 2.0 ns。仿真结果如图 8 所示,碳化硅厚度为 0.4 mm 的曲线峰值比厚度为 0.8 mm 的曲线峰值高大约 70%,这是因为厚度减小,器件的电阻也会减小,但是电阻随厚度减小不成线性关系,所以两条曲线电流峰值相差 70%,而没有达到一倍。对于两条不同厚度的曲线,电流脉冲的峰值从第一个到第四个有一定降低,这是由于电容放电使得电容器电量减少,后续电脉冲的峰值有所降低。电脉冲的峰值相对于光脉冲都有一定时延,这与图 3～5 中对于单脉冲的结果相符合,而且每个脉冲的时延相同。

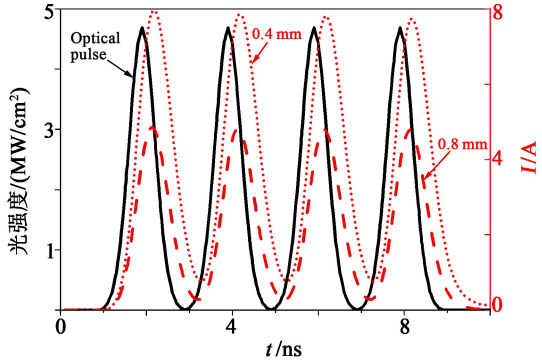


图 8 四个光脉冲串(黑色)和两种衬底厚度(0.4,0.8 mm)条件下的响应电脉冲(红色)曲线

从图 8 还可以看出，对于碳化硅厚度取不同值的两条曲线，两个脉冲之间的极小值都不等于零，这意味着开关的关断不彻底。相对而言，厚度为 0.8 mm 曲线的极小值比厚度为 0.4 mm 曲线极小值更小，开关的关断效果更好。由此推测，采用较大的厚度，减小每个脉冲的脉宽，增加脉冲的间隔，有利于在连续光脉冲激励下实现开关的快速响应。

3　结论

本文使用 Silvaco TCAD 的器件-电路混合模式对 4H-SiC 光导开关进行二维建模仿真，首先固定碳化硅厚度，对不同光能、不同脉宽下开关的单脉冲响应曲线进行详细的计算和分析，结果表明电脉冲的宽度相对于光脉冲有一定展宽，脉冲波形有一定延迟。根据文献[12]中的实验条件，提取出的单脉冲下峰值电流与光能变化曲线与实验数据符合得很好，从而验证了仿真模型的合理性。最后，进一步仿真和分析了部分模型参数对开关响应特性的影响，以及多脉冲串的响应曲线。研究结果对于高重复频率光导开关的研制提供了有益参考。

参考文献：

[1] Alexander B, Borja V. Dynamic tuning of mean carrier momentum relaxation time in InGaAs-InAlAs THz photoconductive switches[J]. IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol., 2017, 7(1): 107-113.

[2] Hyvernaud J, Reineix G, Negrier R, et al. Optoelectronic generation of transient waveforms for UWB radars with rejected frequencies [J]. Int. J. Microwave Wireless Technol., 2020, 12(7): 543-550.

[3] Bora M, Voss L, Grivickas P, et al. A total internal reflection photoconductive switch [J]. IEEE Electron Device Lett., 2019, 40(5): 734-737.

[4] Wu Q L, Zhao Y X, Xun T, et al. Initial test of optoelectronic high power microwave generation from 6H-SiC photoconductive switch [J]. IEEE Electron Device Lett., 2019, 40(7): 1167-1170.

[5] Wang B J, Zhang T, Liu K, et al. Characteristics of the GaAs photoconductive semiconductor switch operated in linear-alike mode[J]. IEEE Trans. on Eletron Devices, 2013, 60(8): 2580-2585.

[6] Cui H, Yang H C, Xu J, et al. Sublinear current-voltage characteristics of linear photoconductive semiconductor switch [J]. IEEE Electron Device Lett., 2016, 37(12): 1590-1593.

[7] Xu M, Liu R J, Shang X Y, et al. High-gain operation of GaAs photoconductive semiconductor switch at 24.3 nJ excitation[J]. IEEE Electron Device Lett., 2016, 37(6): 751-753.

[8] Wang L N, Liu J L. Solid-state nanosecond pulse generator using photoconductive semiconductor switch and helical pulse forming line[J]. IEEE Trans. Plasma Sci., 2017, 45(12): 3240-3245.

[9] Rajeev A, Antonio F, Jorge M, et al. Optical properties of 4H-SiC[J]. J. Appl. Phys., 2002, 91(4): 2009-2013.

[10] Wang B, Wang L, Niu X, et al. Breakdown behavior of SiC photoconductive switch with transparent electrode[J]. AIP Adv., 2022, 12(8): 085210.

[11] Cao P H, Huang W, Guo H, et al. Performance of a vertical 4H-SiC photoconductive switch with AZO transparent conductive window and silver mirror reflector [J]. IEEE Trans. on Electron Devices, 2018, 65(5): 2047-2051.

[12] Wu Q L, Xun T, Zhao Y X, et al. The test of a high-power, semi-insulating, linear-mode, vertical 6H-SiC PCSS [J]. IEEE Trans. on Electron Devices, 2019, 66(4): 1837-1842.

[13] Chu X, Liu J L, Wang L G, et al. MHz repetition frequency, hundreds Kilowatt, and sub-nanosecond agile pulse generation based on linear 4H-SiC photoconductive semiconductor[J]. IEEE Trans. on Electron Devices, 2022, 69(2): 597-603.

[14] Chowdhury A R, Dickens J C, Neuber A A, et al. Assessing the role of trap-to-band impact ionization and hole transport on the dark currents of 4H-SiC photoconductive switches containing deep defects[J]. J. Appl. Phys., 2016, 120(24): 245705.

[15] Silvaco Atlas User's Manual[Z]. Santa Clara: Patrick Henry Drive, 2017.

[16] Lv H L, Zhang Y M, Yang L A, et al. Analytic model of *I-V* characteristics of 4H-SiC MESFETs based on multiparameter mobility model[J]. IEEE Trans. on Electron Devices, 2004, 51(7): 1065-1068.

[17] Onoda S, Ohshima T, Hirao T, et al. Impact of auger recombination on charge collection of a 6H-SiC diode by heavy ions[J]. IEEE Trans. on Nuclear Science, 2007, 54(6): 2706-2713.

[18] Suproniuk M, Kaminski P, Kozlowski R, et al. Current status of modelling the semi-insulating 4H-SiC transient photoconductivity for application to photoconductive switches [J]. Opto-Electron. Rev., 2017, 25(3): 171-180.

[19] Lauer V, Bremond G, Souifi A, et al. Electrical and optical characterisation of vanadium in 4H and 6H-SiC[J]. Mater. Sci. Eng., B, 1999, 61(62): 248-252.

作者简介：

蓝华英(2000—)，男，广西省南宁市人，硕士生，主要研究方向为碳化硅光导时域信号源；

崔海娟(1979—)，女，四川省成都市人，博士，高级工程师，主要研究方向为超宽带电磁学。