

高功率微波与电子系统电路单元相互作用的理论分析

杨一明¹⁾ 朱占平 曾继来 钱宝良

(国防科学技术大学光电科学与工程学院 长沙 410073)

摘要 利用等离子体理论研究了电路中微波等离子体运动对电容元件的影响,给出了可能引起电路扰乱状态的参量条件.当微波等离子体较稀薄时,且微波的频率或等离子体电子的渡越时间高到一定程度时,扰乱阈值与微波频率的平方成正比;如果微波的频率或等离子体电子的渡越时间低到一定程度时,其电场的特性接近直流特性,扰乱阈值与微波频率没有明显的依赖关系.从总体上看,微波频率越低,越容易扰乱集成电路的工作状态.如果等离子体频率与高功率微波频率相接近,则会产生共振效应,此时等离子体电子的振荡的幅值会大幅度提高,更容易扰乱电路的工作状态.

关键词 高功率微波 等离子体 电子系统 扰乱阈值

1 引言

当高功率微波与电子系统相互作用时,会遇到电路中的二极管、电容、电阻、电感等,每个器件因高功率微波作用发生性能的变化都会影响电路的工作状态.高功率微波与半导体器件的作用机理已经有学者做了许多工作,得到了不少有意义的实验结果^[1-3],但是由于涉及的物理因素太多,至今没有较为系统的理论模型.不过,可以针对某一类物理现象,建立简化的理论模型,预期理解其物理规律.例如,在一定条件下,当高功率微波脉冲与复杂电子系统相互作用时会在电路中产生等离子体,等离子体的密度则与高功率微波的频率、脉冲宽度和功率密度有关,这些等离子体中的电子是影响电子系统工作的重要因素之一.因为电子的质量小,处于活跃状态,很容易地从某个加电单元(如电阻、电感和电容等)的一端流向另一端,从而在一定等离子体密度下使整个电路出现不同程度的扰乱状态甚至使系统不能正常工作.在一定条件下选择电子系统中典型的电路单元建立简化的理论模型,利用等离子体理论研究电路中微波等离子体运动对电路元件的影响,得到可能引起电路扰乱状态的参量条件,其结论与众多学者实验总结的一些规律一致^[4-7].

2 建立模型

当高功率微波与电子系统相互作用时,会遇到

RC电路,使电容C内产生等离子体,而等离子体的运动则会使电路的工作状态发生变化,在一定条件下产生扰乱.如图1所示.

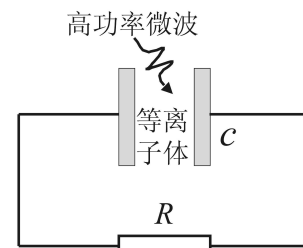


图1 高功率微波与RC电路作用示意图

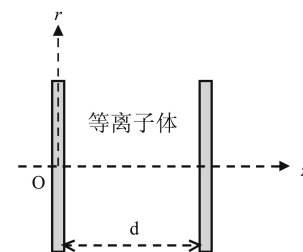


图2 高功率微波与电容器作用简化模型

我们主要考虑微波脉冲与电路中的电容器相互作用,不考虑等离子体的形成过程,因此我们可以按照如图2的简化结构,分析其作用过程.

3 基本方程和解

在图2中,电容器被简化为平板电容器,且电容器

内没有电介质(对应于集成电路的分布电容等, 如果有电介质, 则可以考虑使用更复杂的模型), 等离子体沿着 z 轴方向的运动为一维运动, 使用柱坐标系来研究作用过程. 假设两平板之间的距离为 d .

由 Maxwell 方程组

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

其中 \mathbf{E} 表示电场, \mathbf{D} 表示电位移矢量, \mathbf{B} 表示磁场, \mathbf{j} 表示等离子体电流, ρ 表示等离子体电荷, c 表示真空中的光速. 电场 \mathbf{E} 可以表示成

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_R + \mathbf{E}_L, \quad (2)$$

其中 \mathbf{E}_R 是微波的电场, \mathbf{E}_L 是电容器内等离子体自身电场和电路电压引起的电场之和.

$\nabla \cdot \mathbf{E}_R = 0$ 电磁波在理想金属表面上的边界条件

$$\left. \frac{\partial E_{Rz}}{\partial z} \right|_{z=0} = \left. \frac{\partial E_{Rz}}{\partial z} \right|_{z=d} = 0. \quad (3)$$

另外

$$\frac{\partial E_L}{\partial z} = (en_i - en_e)/\varepsilon_0,$$

其中 n_i 表示离子的密度, n_e 表示电子的密度. 等离子体电子的运动方程可以由流体理论给出, 写成

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = -e(E_L + E_z) = -eE_d - e^2 n z / \varepsilon_0 - eE_0 \cos(\omega t + \phi_0), \quad (4)$$

最终求得

$$z = \frac{eE_0}{m(\omega^2 - \omega_p^2)} \left[-\cos \phi_0 \cos(\omega_p t) + \frac{\omega \sin \phi_0}{\omega_p} \sin(\omega_p t) + \cos(\omega t + \phi_0) \right], \quad (5)$$

其中 $\omega_p = (e^2 n / \varepsilon_0 m)^{1/2}$ 为等离子体频率, (5) 是等离子体中电子从电容器的一个电极向另一个电极运动的轨迹表达式, 反映了等离子体电子的运动特点.

4 结果讨论

利用 (5) 式来研究大部分等离子体电子的运动能够对电路正常工作状态造成影响的参量条件. 我们就不同情况分别加以讨论.

(1) $\omega_p \ll \omega$ 时的结果

如果等离子体比较稀薄, 且 $\omega_p t \ll 1$ 时, 当 $\omega t \gg 1$ 时,

$$\sqrt{z^2} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} z^2 d\phi_0} \approx \frac{eE_0 t}{\sqrt{2} m \omega}. \quad (6)$$

对电路的正常工作状态造成不同程度的影响的条件是 $\sqrt{z^2} = d$, 于是对电路的正常工作状态造成不同程度影响的微波功率或扰乱阈值,

$$p = \alpha E_0^2 = \frac{2\alpha m^2 \omega^2 d^2}{e^2 t^2} \propto \omega^2, \quad (7)$$

其中 α 为耦合系数.

从 (7) 式可以看出, 在一定的参量范围内, 当微波的频率或等离子体电子的渡越时间高到一定程度时, 扰乱阈值与微波频率的平方成正比, 频率越低, 越容易扰乱集成电路的工作状态.

当 $\omega t \ll 1$ 时, 对电路的正常工作状态造成不同程度影响的微波功率,

$$p = \alpha E_0^2 = \frac{8\alpha m^2 d^2}{e^2 t^4}. \quad (8)$$

从 (8) 式可以看出, 在一定的参量范围内, 当微波的频率或等离子体电子的渡越时间低到一定程度时, 其电场的特性接近直流特性, 扰乱阈值与微波频率没有明显的依赖关系.

(2) $\omega_p \approx \omega$ 时的结果

如果所产生的等离子体的电子等离子体频率与高功率微波频率相接近, 则会产生共振效应, 从 (5) 式可以看出, 此时电子的 z 向坐标振荡的幅值会大幅度提高, 更容易扰乱电路的工作状态.

(3) $\omega_p \gg \omega$ 时的结果

这种情况很难建立, 因为要产生很高密度的等离子体, 微波必须达到很高的功率.

5 结论

本文利用等离子体理论研究了电路中微波等离子体运动对电容元件的影响, 给出了可能引起电路扰乱状态的参量条件. 当微波等离子体较稀薄时, 且微波的频率或等离子体电子的渡越时间高到一定程度时, 扰乱阈值与微波频率的平方成正比; 如果微波的频率或等离子体电子的渡越时间低到一定程度时, 其电场的特性接近直流特性, 扰乱阈值与微波频率没有明显的依赖关系. 从总体上看, 微波频率越低, 越容易扰乱集成电路的工作状态. 如果等离子体频率与高功率微波频率相接近, 则会产生共振效应, 此时等离子体电子的振荡的幅值会大幅度提高, 更容易扰乱电路的工作状态.

参考文献(References)

- 1 SHEN Ju-Ai, HUANG Wen-Hua, LIU Guo-Zhi. High Power Leaser and Particle Beams, 1999 (in Chinese) (申菊爱, 黄文华, 刘国治. 强激光与粒子束, 1999)
- 2 WANG Chang-He. Semiconductor Information, 1997, **34**(1): 9—16 (in Chinese) (王长河. 半导体情报, 1997, **34**(1): 9—16)
- 3 FANG Jin-Yong, LIU Guo-Zhi, LI Ping et al. High Power Leaser and Particle Beams, 1999, **11**(5): 639—642 (in Chinese) (方进勇, 刘国治, 李平等. 强激光与粒子束, 1999, **11**(5): 639—642)
- 4 ZHANG Yong-Hua, YANG Zhi-Qiang, LI Ping et al. High Power Leaser and Particle Beams, 2005, **17**(2): 233—236 (in Chinese) (章勇华, 杨志强, 李平等. 强激光与粒子束, 2005, **17**(2): 233—236)
- 5 LIU Yong-Bo, FAN Xiang, HAN Tao. Technology of Electron-Confrontment, 2003, **18**(4): 41—45 (in Chinese) (刘勇波, 樊祥, 韩涛. 电子对抗技术, 2003, **18**(4): 41—45)
- 6 FANG Jin-Yong, SHEN Ju-Ai, YANG Zhi-Qiang et al. High Power Leaser and Particle Beams, 2003, **15**(6): 591—594 (in Chinese) (方进勇, 申菊爱, 杨志强等. 强激光与粒子束, 2003, **15**(6): 591—594)
- 7 LI Ping, LIU Guo-Zhi, HUANG Wen-Hua et al. High Power Leaser and Particle Beams, 2001, **13**(3): 353—356 (in Chinese) (李平, 刘国治, 黄文华等. 强激光与粒子束, 2001, **13**(3): 353—356)

Theoretical Analysis of the Interaction between the High-Power Microwave and the Electronic Circuits

YANG Yi-Ming¹⁾ ZHU Zhan-Ping ZENG Ji-Lai QIAN Bao-Liang

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract A simple theoretical model based on plasma physics is presented to analyze the microwave plasma effects on the electronic circuits. Results show that under certain parameter conditions the threshold for damaging the electronic circuits decreases with the decrease of the frequency of the high-power microwave. In addition, the oscillation amplitudes of the plasma electrons increase dramatically when the plasma frequency is near the high-power microwave frequency, which can easily damage the electronic circuits.

Key words high-power microwave, electronic circuits, plasma, harassment threshold value