

# 表面波等离子体源的发展现状

董太源<sup>†</sup> 叶坤涛 刘维清

(江西理工大学理学院, 赣州 341000)

(2011年11月15日收到; 2011年12月26日收到修改稿)

对微波放电产生的平板型表面波等离子体源进行了系统介绍, 分析了表面波等离子体的工作原理, 探讨了维持表面波等离子体放电的能量吸收机制, 介绍了由单模谐振腔阵列、亚波长衍射光栅及开槽天线阵列组成的新型波模转换器. 表面波等离子体的产生物理、实现途径、参数特性和数值仿真等方面的研究进展及其所取得的成果, 有利于促进新型表面波等离子体源走向产业化应用, 并促使微电子产业的功效取得新的突破.

**关键词:** 表面波, 等离子体, 表面等离激元, 微波放电

**PACS:** 52.50.Dg, 52.65.Kj, 52.40.Db

## 1 引言

随着半导体晶片超微细加工、液晶显示器、太阳能电池、生物医学高分子薄膜及高聚物的表面改性等领域的迅速发展, 近年来迫切需要发展大面积均匀、低气压高密度、大口径 ( $\geq 30$  cm) 的新型等离子体源. 此外, 多晶硅薄膜、金刚石薄膜、碳纳米管等的生成, 大面积高密度等离子体源同样充当重要角色. 在众多等离子体源中, 平板型表面波等离子体 (SWP) 源是一种有希望同时满足以上苛刻要求的优良等离子体源. 与其他类型的等离子体源相比, SWP 具有许多无可比拟的优点: 无需 ECR 等离子体或螺旋波等离子体那样的磁场, 结构和机理相对简单; 不存在平板型等离子体那样因电极插入而导致的杂质污染问题; 便于产生截止密度以上的大面积高密度均匀稳定等离子体; 用小尺度的开口天线, 就可以通过表面波的传播实现等离子体的大口径化, 已经成为下一代超大规模集成电路器件加工的强有力竞争者.

在表面波等离子体中, 微波 (2.45 GHz) 是通过狭缝天线耦合进入真空室内的, 在狭缝的正下方首先击穿气体放电, 形成高密度等离子体. 当微波功率高时, 电磁波传输到临界密度层要被反射回来, 沿介质板和等离子体界面往四周传播, 其能量被约束在界面附近的区域内, 并随传播距离成指数衰

减. 如果入射功率足够大, 电磁波沿界面传输到真空室壁处的强度还足够强, 这样表面波将在腔室内来回反射, 在表面波的电场作用下, 电子被加速, 等离子体就被提供了能量, 即可产生大面积均匀的高密度等离子体. 目前, 在这个领域已取得了很大进步, 并且已有好几个表面波等离子体源已经在工业应用中充当重要角色. 国内外的研究现状是: (1) 日本从 1994 年开始研究, 到 1996 年基本成熟, 1998 年实现产业化, 2003 年改变天线激发方式, 完成等离子体参数可控的大面积的 SWP<sup>[1,3-19]</sup>; (2) 葡萄牙 Tatarova 等 2005 年发表文章称他们已完成纯表面波 TM<sub>33</sub> 模的生成, 用粒子模拟了纯表面波与氩等离子体的耦合和电子与氩气原子活化情况, 模拟结果和试验结果的误差在 5% 以内<sup>[20,21]</sup>; (3) 我国台湾国立清华大学采用梳状慢波周期结构生成大面积表面波等离子体, 并研究了表面电磁波与等离子体间的共振机制<sup>[22-26]</sup>; (4) 中国科学院等离子体研究所、复旦大学和中国科学技术大学各自完成直径 30 cm 和直径 22 cm 的圆柱体表面波等离子体源, 进行了大量有关表面波等离子体的特性研究及应用分析<sup>[27-34]</sup>; (5) 华中科技大学电气学院在 2005 年建造了一套长方体表面波等离子体源<sup>[35-41]</sup>. 但是还是有许多问题亟待解决, 特别是开槽天线和表面波的耦合机制以及如何优化设计开槽天线的结构等问题还没有得到很好的解决; 表面波等离子体的放电机理还不够清楚, 特别是低气

<sup>†</sup> E-mail: dongtaiyuan@yahoo.com.cn

压下 ( $< 10 \text{ Pa}$ ), 碰撞模型已不能成立, 亟待探寻解释这些现象的理论.

国内外所报道的腔体结构大多是圆柱体, 华中科技大学刘明海教授课题组采用矩形腔体结构, 狭缝天线可以沿反应室的纵向排成阵列结构, 这样天线的数量和结构布局均有很大的选择余地; 通过对狭缝天线的优化设计, 便可产生大面积均匀的高密度等离子体. 考虑到工业实际应用, 采用长方体结构可以满足不同领域的需要, 因为不但长度可以改变, 而且宽度也可以加宽. 对于大口径的工业应用, 只要微波传输功率足够高, 用功率分配器将微波分成几路, 将长方体宽边对接便可实现大体积 (尺度达  $1 \text{ m}$ ) 等离子体源. 此外, 现有的表面波装置激发效率低下, 且放电模式跳动, 不利实际工艺控制. 如何提高放电效率、放电稳定性和均匀性, 是迫切需要解决的问题.

## 2 表面波等离子体的研究现状

传统的研究方法有实验观测和理论分析两种, 而随着计算机科学的发展出现了数值模拟研究的新手段. 此外, 为了在地面环境中研究一定参数的等离子体性质, 还必须建造相应的实验装置, 许多大型实验装置的建造往往涉及特有的工程技术. 因此等离子体的研究有赖于实验、理论、数值模拟和工程技术的良好配合, 它们作为四个顶角, 构成了等离子体研究的四面体结构, 两两之间均存在密切的联系 [42,43].

SWP 属于非热平衡等离子体, 其特点是电子温度远远大于离子和中性粒子的温度, 我们把具有此特点的等离子体称为低温等离子体. 研究 SWP 的方法, 同样需要从理论、实验、工程技术和数值模拟四个方面着手.

### 2.1 SWP 的机理研究

利用微波在介质表面附近激发出截止密度以上的等离子体, 然后微波将在介质与等离子体间形成表面波, 具有一定电场强度的表面波在其传输的范围内可生成和维持高密度的等离子体, 因此称为表面波等离子体 [44-49]. 最早利用表面波激发等离子体的方法是将微波导入到介质管上, 在介质管壁上激发出表面波传输, 就可在管内生成表面波等离子体 [50-55]. 由于表面波通常只存在于介质表面附近, 因此产生的等离子体厚度受到限制, 即使介质管的直径再大, 也只能在管内壁附近产生一层环状的等离子体, 此外介质管通常是穿过微波波导宽边

的开口进行耦合的, 因此直径受到波导尺寸的限制, 通常直径只有数厘米. 这种表面波等离子体源, 易生成狭长的等离子体, 由于形状的原因, 使得它的应用面受到很大限制. 近些年来, 针对大面积或大体积加工的需求, 科研人员利用表面波激发等离子体的原理, 积极研究在大的平面或柱面介质表面激发表面波从而生成大平面或大体积的等离子体的方法, 发展了一些新型的表面波等离子体源, 使得表面波等离子体源的工业应用范围大大拓展, 有些用表面波等离子体处理工艺是其他类型等离子体源所无法取代的 [1-21]. 早期大面积表面波放电的机理研究在于微波与等离子体波模间的自耦合问题; 后来逐渐转移到实现微波能量如何均匀到尺寸较大的平面或体积内, 科研人员逐渐清楚了表面波维持放电的首要问题是要求在工程技术上设计一种大面积的慢波结构 [21-39].

### 2.2 SWP 的工程技术实现

在对表面波维持放电机理有一定了解之后, 摆在科研人员面前的首要问题就是如何实现表面波等离子体源的稳定工作. 首先人们想到的就是一根介质管插在波导管上的常见的 waveguide surfatron 结构 [44,55], 这种结构很好地实现了表面波放电, 对表面波放电的机理验证做出了贡献, 且实现了等离子体天线设计, 但对大面积微电子工艺的要求却不能满足. 科技人员于是就想到用一根很粗的介质管取代细管作为表面波等离子体的产生腔体, 这就遇到了波导管的尺寸不能覆盖很粗的介质管的现实问题, 于是就设计出各种微波能量耦合器件来满足设计初衷, 微波耦合方式就由单缝耦合转变为环形谐振腔狭缝天线阵的侧面耦合 [28-34]. 由于管径较大, 这样产生的等离子体只是在器壁附近密度较大, 轴心处的密度低约一个数量级, 腔体半径越大, 等离子体密度的径向均匀性就越差, 这就不能很好地满足大面积均匀等离子体源的要求. 微电子行业的突飞猛进, 迫切要求平面大面积的高密度均匀稳定等离子体源, 于是就出现了顶部开槽天线激发大面积高密度等离子体源. 顶部狭缝激发平面大面积表面波等离子体易于实现产生大面积高密度等离子体, 很适用于大面积的等离子体工艺需求.

两个较有代表性的平面大面积表面波等离子体源 [1] 是 Sumitomo Metal Industries Ltd. (日本) 的 SW4010 和 Shibayra Engineering Works Co. Ltd. (日本) 的  $\mu$ ASH800. 可是, 现有的装置均工作于较低的气压下, 当气压较高时, 这种大面积的等离子体源的均匀稳定性能就会出现. 另外, 当输入

功率变化时, 等离子体会出现不连续的非线性跳动, 这对实际工艺是致命的. 此时, 就有研究者设计出不同的开槽天线结构来改善等离子体源的性能及可控性. 较好的改进者有多孔 (多达上千小孔) 开槽天线结构、内置同轴能量耦合器结构和梳状慢波周期结构等. 这些都从不同侧面很好地控制了等离子体的性能, 满足了不同的实际工艺需求<sup>[56-60]</sup>. 但也有其各自的不足点, 如一种结构对应特定装置, 不能大面积拓展; 许多装置都由实验测得参数后改进而半经验设计的, 理论机制不是特别清楚; 还有就是造价昂贵, 实际加工难度大等缺点.

### 2.3 SWP 的实验研究

为了精确控制表面波等离子体的参数, 必须深入了解 SWP 的物理化学机制, 才能生产下一代大面积新型表面波等离子体. 对理论基础和工程技术有了一定的了解之后, 就需要在实验上验证或改进表面波等离子体的参数性能. 在实验方面, 之前的工作主要分为 SWP 源自身设计的研究型实验和 SWP 源应用开发型实验.

前者, 从微波能量传输过程看, 主要的实验内容包括以下四个方面的研究探索<sup>[12]</sup>. (1) 微波源与天线耦合机制的研究 (microwave source to antenna coupling). 主要是设计微波源、微波传输线、电抗元件、连接分支元件和反射功率吸收元件等, 主要目的是实现微波能量高效地用于激发产生等离子体. 日本人成功发展的适合大面积晶片处理的表面波等离子体源, 采用 TEFLON 构成平板型慢波结构, 设计了楔形微波耦合器件来增强微波能量耦合; 我国台湾国立清华大学的研究组也设计出两种不同的耦合器, 一种以渐变波导口作为耦合器, 另一种是陶瓷棒介质耦合器; 还有常用的探针耦合器, 多用于矩形器件与圆柱器件间的耦合; 等等. (2) 天线激发微波与表面波的形成 (antenna excitation to surface-wave coupling), 这项工作主要根据不同的等离子体腔体结构设计出不同的天线结构, 实现大面积等功率的微波辐射面. 日本人曾研究过不同的开槽结构产生不同的表面波模式分布, 最后得到一种“八”字形开槽天线用于圆柱体表面波等离子体的激发源, 为了进一步改善表面波的均匀性, 还在玻璃介质板下加入周期的介质棒; 同时日本的另一课题组采取相控对称开槽来满足矩形平板表面波的生成; 还有采用多缝或多孔天线结构来生成大面积等离子体的; 国内复旦大学的梁荣庆教授则开发出环形波导开槽天线与顶部环形开槽短路波导天线共同工作, 实现体等离子体源的建成; 等等.

(3) 表面电磁波与表面波等离子体的放电维持 (wave absorption process). 纯表面电磁波的形成必须有大面积的高密度等离子 (大于截止密度) 的存在, 否则形成的则是混杂表面波, 甚至是体积模式放电. 日本人经过大量实验, 均发现表面波的模式与等离子体的密度相关, 而等离子体的密度又与气体种类和微波功率相关, 这就造成了复杂的非线性现象, 表面波模的非连续性跳动, 对实际工艺十分不利, 也限制了表面波的应用, 这也就是为什么表面波等离子体有诸多优点, 而没有在等离子体工艺中占明显优势的主要原因之一; 国内的梁荣庆教授和詹如娟教授在各自的装置上也发现了类似现象; 当然, 日本人采用多孔天线或加周期介质条的方式来压制模式跳动, 取得了成功, 但是, 是以牺牲微波使用效率为代价, 或机理不清楚. (4) 电子能量分布与反应气体分子的活化 (ionization and dissociation). 表面波等离子体源在实验和理论上均发现, 等离子体区可分为微波与等离子体强相互作用区和等离子体扩散区. 实验者通过探针测量或光谱诊断, 均发现电子能量分布在强相互作用区成双麦氏分布, 即有大量高能电子存在, 而在扩散区的电子能量分布就是正常的麦氏分布. 根据反应气体的不同, 表面波等离子体的活性粒子是不同的, 有时等离子体的密度和温度分布差别达到一两个数量级.

后者, 在应用开发上, 除了已经在微电子工艺中显示功能的表面波处理应用 (前面提及的日的两台) 外, 近来在表面波等离子体大面积杀菌也已取得进展<sup>[61-63]</sup>; 还有改进表面波等离子体源结构, 设计出特种等离子体源<sup>[64-78]</sup>, 如有研究者设计出离子能量可控的离子源<sup>[79,80]</sup>; 等等.

### 2.4 SWP 的数值模拟

随着大量柱形表面波等离子体源的产生, 研究者们对其放电机理进行了理论和实验上的研究. 在无磁场作用下, 研究者发现放电产生的等离子体与维持放电的微波分布有着强的电动力学相互作用. 将麦克斯韦方程组、电子在表面波场中 (局域碰撞和输运) 的波尔兹曼方程、电子和离子的连续性方程及其动量和能量传输方程结合在一起, 就可组建一组关于等离子体参数和表面波场分布的自洽方程组.

近来, 用粒子模拟法模拟了等离子体和金属边界的壳层结构, 指出正是由于这样的壳层存在, 给表面波的传播提供了一个通道, 同时还研究了壳层内的电荷分布情况与表面波的相互作用机制

等, 均能较成功地解释表面波维持放电的物理机制<sup>[81-83]</sup>. 但是要分析研究表面波等离子体模型, 用粒子模拟法是很难做到的. 因为粒子模拟法受到计算机计算能力的限制, 能够处理的模型规模小或很费时, 再者现今的表面波等离子体源的几何尺寸决定了不可能用其处理研究, 即使简化模型成二维结构, 粒子模拟仍然难于描述所有现象.

于是, 研究者开始用简化的模型来模拟表面波等离子体的放电特性, 以便于解释实验现象, 证明理论预言. 之前这方面的研究多数是用二维的简化结构来模拟的, 一般模型做了大量简化和假设, 很多原始参数直接来自于部分实验数据, 结果也只能定量地解释部分实验结果和理论预言, 但同时预言了一些新现象, 为装置优化改造指明了方向. 这方面的研究进展如下: (1) Chen 等<sup>[84]</sup> 最早用无磁化冷等离子体方程与麦克斯韦方程相结合, 假设等离子体密度是大于截止密度的, 用二维时域有限差分法 (FDTD) 证明了表面波的存在, 以及装置内空气层的影响; (2) Toba 和 Katsurai<sup>[85]</sup> 用二维 FDTD 模拟得出等离子体密度和电子温度的空间分布; (3) Igarashi 等<sup>[86]</sup> 用二维有限元程序, 同样模拟了电磁场在表面波等离子体源内的分布情况, 结果与理论、实验及 FDTD 模拟结果均一致; (4) Henriques 等<sup>[21]</sup> 采用自洽模型, 计算了表面波场区及扩散等离子体区的振动态和激发态粒子 (氮氩混合气体) 分布情况, 结果和实验完美自洽. 此外, 类似的报道见参考文献 [87—91].

综合以上这些文献可以看出, 之前的模拟多是用二维简化程序来做的计算. 完整的三维模拟还有待我们去研究. 文献 [37—41, 92, 93] 已用三维 FDTD 程序进行了表面波等离子体源的数值模拟研究工作. 值得注意的是, 近来商业电磁仿真软件的功能正日益强大, 典型的如 MAFIA, CST, HFSS 和 COMSOL 等. Graf 等<sup>[94]</sup> 就是用 COMSOL 商业多物理场耦合软件, 对一种椭圆表面波等离子体装置内的三维电磁场分布进行过研究.

### 3 国内表面波等离子体近期研究现状

在中国大陆, SWP 源的近期研究主要以复旦大学梁荣庆教授的课题组<sup>[27,29,30]</sup> 和华中科技大学刘明海教授的课题组<sup>[95-100]</sup> 为代表. 此外, 西安交通大学的徐均琪老师研制 SWP 源用来沉积类金刚石薄膜, 也取得了很好的成果<sup>[101,102]</sup>. 本文主要介绍依据表面等离激元机理微波激励产生的 SWP 源的研究进展.

表面等离激元 (surface plasmon polariton,

SPP) 是由光 (电磁波) 与金属 (负介电常数物质) 表面自由电子相互作用引起的一种电磁波模式<sup>[103-106]</sup>. 它局限于金属与介质界面附近, 能形成增强近场. 如前所述, 表面波等离子体的密度一般很高, 当等离子体频率远远大于入射电磁波频率时, 等离子体的等效介电常数就会为负值. 当入射电磁波照到等离子体表面时, 对于电磁波来说, 就像遇到金属一样被反射. 金属不是理想导体, 反射电磁波时, 会耗散电磁波的能量, 同样当电磁波被高密度等离子体反射时, 也会消耗部分电磁波的能量. 可见高密度等离子体与金属在入射电磁波面前表现了部分相似的特性. 那么电磁波照到等离子体表面时, 必然与等离子体内的大量自由电子发生强烈的相互作用, 也会激起一种电磁模式, 这种电磁模式就是表面电磁波. 但是等离子体必定不是金属, 有自己不同于金属的地方, 对于等离子体表面激元理论也有其不同于金属表面激元理论的特点. 梁荣庆教授曾在实验上发现高密度表面微波放电确实有等离子体激元存在<sup>[27]</sup>; 而文献 [105, 106] 也利用光栅结构实现了外来电磁波向表面等离子体激元的转化. 但是, 实实在在在设计能量耦合器件, 把外来电磁波转变为表面等离子体激元所携带的表面波来加热等离子体的研究, 在理论及实验上都没有见到报道. 刘明海教授指导其学生陈兆权博士设计了亚波长光栅结构开槽天线阵列激励的 SPP 加热型 SWP 源<sup>[95-97]</sup>.

研究认为放电过程如下: 微波经由开槽天线进入谐振腔, 在谐振腔中重新分布微波能量后再由光栅结构进入低气压腔体. 游离于低气压腔内的少数电子受微波场驱动, 电子速度迅速增大到气体原子的电离所需的能量时, 就会局部出现放电, 刚电离的电子伙同原先的种子电子继续被微波场加速. 如此链式电离过程, 使得腔内等离子体密度迅速增大, 当增大到截止密度时, 微波能量会被反射在低密度区域, 这就就会出现微波能量压缩与等离子体密度分布重新布局的结果. 当然微波能量被压缩的过程, 也是微波能量被吸收的过程, 那些没有持续能量供给的地方, 就不再有微波存在, 就会致使微波能量存在于激发源所在石英玻璃之下. 但是, 综合作用的结果, 还是等离子体密度继续攀升, 达到共振临界密度之上后, 就会出现等离子体激元, 也就出现了表面电磁场. 仅有表面电磁波的出现还不足于维持均匀稳定放电, 因为表面波场会被等离子体吸收掉, 这就有赖于亚波长光栅的作用了. 亚波长的辐射近场与激元的表面波场恰好相匹配, 就出现表面波共振加强. 得到持续加强的表面波场, 会持续地

加速高密度电子,被加速到高能级的电子会频繁地碰撞中性原子.结果是波场幅值大的地方,激发态原子的密度就大,退激的原子概率也相对大些,就会出现放电斑图.被加速的电子局限于表面波存在区域,同时会被有质动力拉到低密度区域,扩散的作用同样迫使高速电子在到低密度区的概率大些.总之,有源区的电子吸收表面波能量,运动到低密度区,维持了整个放电的平衡.相比于同类 SWP 源, SPP 驱动微波放电源,结果是放电稳定、可控.利用亚波长光栅,成功使得微波转变为表面波,用于大面积均匀稳定高效放电.

#### 4 表面波等离子体技术的应用前景

等离子体的应用有:等离子体辅助薄膜沉积、等离子体聚合、材料表面改性、生物样品处理、纳米材料制备、等离子体化学、电子束、离子束和激光束的产生等.表面波等离子体既包含等离子体的性质,又有独特的性质,因此它还具有很多独特的应用.

在具有某些特殊性质的材料(如超导体和超大

磁电阻材料)上加工出具有微米以及亚微米尺寸的各种周期性人工金属纳米结构,研究周期性金属纳米结构的表面等离子体光子学特性,可以用来探索利用可调光栅的动力学特征和其表面等离子体光子学特性来设计集分子质量传感和表面增强光谱传感为一体的多功能超灵敏传感器.

通过研究基于表面波驱动的等离子体天线及阵列可以用于隐身、通信等方面.等离子体隐身技术是利用等离子体来回避探测系统.设计等离子体的特征参数,使其对雷达波大量吸收和散射来减小飞行器的雷达散射截面,使敌方难以探测.此技术也可用于减小飞行器的飞行阻力.

宇宙中绝大部分物质都处于等离子体态,我们也可利用霍尔效应,使表面波等离子体应用于空间推进器.

低温等离子体应用最广泛的领域可能要属薄膜材料的制备. SWP 源能够实现大面积,因此能极大地提升生产效率,降低成本.它的快速发展将带来太阳能电池薄膜等领域的变革.

总之,可以看到, SWP 源因其具有独特的性能,将在国民生产和科学研究中起到重要作用.

- [1] Sugai H, Ghanashev I, Nagatsu M 1998 *Plasma Sources Sci. Technol.* **7** 192
- [2] Sugai H (Translated by Zhang H B, Zhang D) 2002 *Plasma Electric Engineering Science* (Beijing: Science Press) pp56–60, pp134–145 (in Chinese) [菅井秀郎著,张海波,张丹译 2002 等离子体电子工程学(北京:科学出版社)第 56—60 页,第 134—145 页]
- [3] Ganachev I, Sugai H 2003 *Surface and Coatings Technology* **174–175** 15
- [4] Odrobina I, Kudela J, Kando M 1998 *Plasma Sources Sci. Technol.* **7** 238
- [5] Sugai H, Ahn T H, Ghanashev I, Goto M, Nagatsu M, Nakamura K, Suzuki K, Toyoda H 1997 *Plasma Phys. Control. Fusion* **39** A445
- [6] Nagatsu M, Morita S, Ghanashev I, Ito A, Toyoda N, Sugai H 2000 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **33** 1143
- [7] Yasaka Y, Hojo H 2000 *Phys. Plasmas* **7** 1601
- [8] Ghanashev I, Nagatsu M, Morita S, Sugai H 1998 *J. Vac. Sci. Technol. A* **16** 1537
- [9] Yamauchi T, Aoki K, Kanoh M 2001 *J. Vac. Sci. Technol. A* **19** 2433
- [10] Nagatsu M, Xu G, Ghanashev I, Kanoh M, Sugai H 1997 *Plasma Sources Sci. Technol.* **6** 427
- [11] Ghanashev I, Nagatsu M, Xu G, Sugai H 1997 *Jpn. J. Appl. Phys.* **36** 4704
- [12] Ghanashev I, Sugai H 2000 *Phys. Plasmas* **7** 3051
- [13] Nagatsu M, Xu G, Yamage M, Kanoh M, Sugai H 1996 *Jpn. J. Appl. Phys.* **35** L341
- [14] Kousaka H, Ono K, Umehara N, Sawada I, Ishibashi K 2006 *Thin Solid Films* **506–507** 503
- [15] Nagatsu M, Ghanashev I, Sugai H 1998 *Plasma Sources Sci. Technol.* **7** 230
- [16] Nagatsu M, Naito K, Ogino A, Nanko S 2006 *Plasma Sources Sci. Technol.* **15** 37
- [17] Ghanashev I, Nagatsu M, Sugai H 1997 *Jpn. J. Appl. Phys.* **36** 337
- [18] Kudela J, Terebessy T, Odrobina I, Kando M 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 1132
- [19] Sugai H, Ghanashev I, Mizuno K 2002 *Appl. Phys. Lett.* **77** 3523
- [20] Tatarova E, Dias F M, Henriques J, Ferreira C M 2005 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **33** 866
- [21] Henriques J, Tatarova E, Dias F M 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 103304
- [22] Wu T J, Kou C S 1999 *Rev. Sci. Instrum.* **70** 2331
- [23] Wu T J, Kou C S 2005 *Phys. Plasmas* **12** 103504
- [24] Wu T J, Guan W J, Tsai C M, Yeh W Y, Kou C S 2001 *Phys. Plasmas* **8** 3195
- [25] Zhang J H, Wei H W, Weng Z H, Liu K Q, Li A P, Kou C S, Wu M W, Zeng J Q, Cai W F, Zheng G C 2006 *Phys. Bimonthly* **28** 440 (in Chinese) [张家豪,魏鸿文,翁政辉,柳克强,李安平,寇崇善,吴敏文,曾锦清,蔡文发,郑国川 2006 物理双月刊(台湾) **28** 440]
- [26] Wu T J 2001 *Ph. D. Dissertation* (Taiwan Xinzhu: Qinghua University) (in Chinese) [吴仓聚 2001 博士学位论文(台湾新竹:国立清华大学)]
- [27] Xu X, Liu F, Zhou Q H, Liang B, Liang Y Z, Liang R Q 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 011501
- [28] Wu C F, Zhan R J, Wen X H, Huang W D 2001 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **29** 13
- [29] Liang Y Z, Ou Q R, Liang B, Liang R Q 2008 *Chin. Phys. Lett.*

- 25 1761
- [30] Liang B, Ou Q R, Liang Y Z, Liang R Q 2007 *Chin. Phys.* **16** 3732
- [31] Zhan R J, Wu C F, Wen X H, Zhu X D, Zhou H Y 2011 *Vacuum Science and Technology* **21** 30 (in Chinese) [詹如娟, 吴丛凤, 温小辉, 朱晓东, 周海洋 2011 真空科学与技术 **21** 30]
- [32] Wu C F, Wen X H, Zhan R J 1998 *J. Microw.* **14** 147 (in Chinese) [吴丛凤, 温小辉, 詹如娟 1998 微波学报 **14** 147]
- [33] Ou Q R, Liang R Q 2002 *Vacuum & Cryogenics* **8** 28 (in Chinese) [欧琼荣, 梁荣庆 2002 真空与低温 **8** 28]
- [34] Nie C H, Su X B 2000 *Vacuum & Cryogenics* **6** 111 (in Chinese) [聂传辉, 苏小保 2000 真空与低温 **6** 111]
- [35] Liu M H, Sugai H, Hu X W, Ishijima T, Jiang Z H, Li B, Dan M 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5905 (in Chinese) [刘明海, 菅井秀郎, 胡希伟, 石岛芳夫, 江中和, 李斌, 但敏 2006 物理学报 **55** 5905]
- [36] Chen Z Q, Liu M H, Zhou P Q, Chen W, Lan C H, Hu X W 2008 *Plasma Sci. Technol.* **10** 655
- [37] Lan C H, Hu X W, Liu M H 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 035204
- [38] Lan C H, Chen Z Q, Liu M H, Jiang Z H, Hu X W 2009 *Plasma Sci. Technol.* **11** 66
- [39] Chen Z Q, Liu M H, Lan C H, Chen W, Luo Z Q, Hu X W 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 4333
- [40] Lan C H, Hu X W, Jiang Z H, Liu M H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4093 (in Chinese) [蓝朝辉, 胡希伟, 江中和, 刘明海 2010 物理学报 **59** 4093]
- [41] Lan C H, Hu X W, Liu M H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 025205 (in Chinese) [蓝朝辉, 胡希伟, 刘明海 2011 物理学报 **60** 025205]
- [42] Chen F F (Translated by Lin G H) 1980 *Introduction to Plasma Physics* (Beijing: People's Education Press) pp2–11 (in Chinese) [Chen F F 著, 林光海译 1980 等离子体物理学导论 (北京: 人民教育出版社) 第 2—11 页]
- [43] Ma T C, Hu X W, Chen Y H 1988 *The Principle of Plasma Physics* (Hefei: University of Science and Technology of China Press) pp20–76 (in Chinese) [马腾才, 胡希伟, 陈银华 1988 等离子体物理原理 (合肥: 中国科技大学出版社) 第 20—76 页]
- [44] Trivelpiece A W, Gould R W 1959 *J. Appl. Phys.* **30** 1784
- [45] Moisan M 1974 *Plasma Phys.* **16** 1
- [46] Shivarova A, Zhelyazkov I 1978 *Plasma Phys.* **20** 1049
- [47] Moisan M, Zakrzewski Z, Pantel R 1979 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **12** 219
- [48] Moisan M, Zakrzewski Z, Pantel R, Leprince P 1984 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **PS-12** 203
- [49] Moisan M, Zakrzewski Z 1991 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **24** 1025
- [50] Moisan M, Beaudry C, Leprince P 1974 *Phys. Lett.* **50A** 125
- [51] Moisan M, Beaudry C, Leprince P 1975 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **PS-3** 55
- [52] Zakrzewski Z, Moisan M, Glaude V M N, Beaudry C, Leprince P 1977 *Plasma Phys.* **19** 77
- [53] Moisan M, Shivarova A, Trivelpiece A W 1982 *Plasma Phys.* **24** 1331
- [54] Moisan M 1987 *Rev. Sci. Instrum.* **58** 1895
- [55] Margot J, Moisan M 1993 *J. Plasma Phys.* **49** 357
- [56] Tian C, Nozawa T, Ishibasi K, Kameyama H, Morimoto T 2006 *J. Vac. Sci. Technol. A* **24** 1421
- [57] Yasaka Y, Ishii N, Yamamoto T, Ando M, Takahashi M 2004 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **32** 101
- [58] Yamamoto T, Ono M, Ando M, Ando M, Goto N, Ishii N, Yasaka Y 2001 *Jpn. J. Appl. Phys.* **40** 380
- [59] Yasaka Y, Koga K, Ishii N, Yamamoto T, Ando M, Takahashi M 2002 *Phys. Plasmas* **9** 1029
- [60] Yasaka Y, Nozaki D, Koga K, Ando M, Yamamoto T, Goto N, Ishii N, Morimoto T 1999 *Plasma Sources Sci. Technol.* **8** 530
- [61] Nagatsu M, Terashita F, Nonaka H, Xu L, Nagata Y, Koide Y 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 211502
- [62] Xu L, Terashita F, Nonaka H, Ogino A, Nagata T, Koide Y, Nanko S, Kurawaki I, Nagatsu M 2006 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **39** 148
- [63] Moreau S, Moisan M, Tabrizian M, Barbeau J, Pelletier J, Ricard A, Yahia L H 2000 *J. Appl. Phys.* **88** 1166
- [64] Miyamoto Y, Tamai Y, Daimon K, Esaki M, Takeno H, Yasaka Y 2006 *Thin Solid Films* **506–507** 622
- [65] Tsuji A, Yasaka Y, Takeno H 2008 *Surface & Coatings Technol.* **202** 5306
- [66] Tamai Y, Miyamoto Y, Hayashi T, Tsuji A, Takeno H, Yasaka Y 2006 *Thin Solid Films* **506–507** 626
- [67] Jain A P, Parashar J 2005 *J. Phys.* **65** 311
- [68] Sugai H, Ghanashev I, Hosokawa M, Mizuno K, Nakamura K, Toyoda H, Yamauchi K 2001 *Plasma Sources Sci. Technol.* **10** 378
- [69] Kumar G, Tripathi V K 2008 *Phys. Plasmas* **15** 073504
- [70] Levaton J, Ricard A, Henriques J, Silva H R T, Amorim J 2006 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **39** 3285
- [71] Aramaki M, Kobayashi J, Kono A, Stamate E, Sugai H 2006 *Thin Solid Films* **506–507** 679
- [72] Hotta Y, Toyoda H, Sugai H 2007 *Thin Solid Films* **515** 4983
- [73] Stamate E, Holtzer N, Sugai H 2006 *Thin Solid Films* **506–507** 571
- [74] Siry M, Sakata S, Terebessy T, Kando M 2006 *Jpn. J. Appl. Phys.* **45** 2749
- [75] Nakao S, Stamate E, Sugai H 2007 *Thin Solid Films* **515** 4869
- [76] Mezerette D, Kuroda M, Sugai H 2005 *Thin Solid Films* **475** 178
- [77] Takagi Y, Gunjo Y, Toyoda H, Sugai H 2008 *Vacuum* **83** 501
- [78] Ganachev I P, Sugai H 2005 *Surface & Coatings Technol.* **200** 792
- [79] Hara Y, Takashima S, Yamakawa K, Den S, Toyoda H, Hori M 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 231502
- [80] Hara Y, Takashima S, Yamakawa K, Den S, Toyoda H, Sekine M, Hori M 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 053301
- [81] Bowers K J 2001 *Ph. D. Dissertation* (Berkeley: University of California)
- [82] Cooperberg D J, Birdsall C K 1998 *Plasma Sources Sci. Technol.* **7** 41
- [83] Schlüter H, Shivarova A 2007 *Phys. Reports* **443** 121
- [84] Chen Q, Aoyagi P H, Katsurai M 1999 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **27** 164
- [85] Toba T, Katsurai M 2002 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **30** 2095
- [86] Igarashi H, Watanabe K, Ito T, Fukuda T, Honma T 2004 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **30** 605
- [87] Okamura Y, Yamamoto Y, Fujita K, Miyoshi T, Teramoto K, Kawaguchi H, Kagami S, Furukawa M 2007 *J. Vac. Sci. Technol. A* **25** 816
- [88] Nagatsu M, Naito K, Ogino A, Ninomiya K, Nanko S 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 161501
- [89] Kousaka H, Ono K 2002 *Jpn. J. Appl. Phys.* **41** 2199
- [90] Denysenko I B, Gapon A V, Azarenkov N A, Ostrikov K N, Yu M Y 2002 *Phys. Rev. E* **65** 046419
- [91] Hassouni K, Grotjohn T A, Gicquel A 1999 *J. Appl. Phys.* **86** 134
- [92] Chen Z, Liu M H, Lan C H, Chen W, Tang L, Luo Z Q, Yan B R, Lü J H, Hu X W 2009 *Chin. Phys. B* **18** 3484
- [93] Lan C H, Lan C Z, Hu X W, Chen Z Q, Liu M H 2009 *Chin. Phys. B* **18** 2412
- [94] Graf M, Rauchle E, Urban H, Kaiser M, Alberts L, Emmerich R, Elsner P 2005 *Surface & Coatings Technol.* **200** 904
- [95] Chen Z Q, Liu M H, Tang L, Hu P, Hu X W 2009 *J. Appl. Phys.* **106** 013314

- [96] Chen Z Q, Liu M H, Tang L, Lü J H, Wen Y F, Hu X W 2009 *J. Appl. Phys.* **106** 063304
- [97] Chen Z Q, Liu M H, Hong L L, Zhou Q Y, Cheng L L, Hu X W 2011 *Phys. Plasmas* **18** 013505
- [98] Chen Z Q, Liu M H, Tang L, Lü J H, Hu X W 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 025205
- [99] Chen Z Q, Liu M H, Zhou Q Y, Hu Y L, Yang A, Zhu L J, Hu X W 2011 *Chin. Phys. Lett.* **28** 045201
- [100] Hu Y L, Chen Z Q, Liu M H, Hong L L, Li P, Zheng X L, Xia G Q, Hu X W 2011 *Chin. Phys. Lett.* **28** 115201
- [101] Xu J, Kousaka H, Umehara N, Diao D 2006 *Surf. & Coatings Technol.* **201** 408
- [102] Xu J Q, Fan H Q, Kousaka H, Umehara N, Diao D F, Liu W G 2007 *Diamond and Related Materials* **16** 161
- [103] Agranovich V M, Mills D L 1982 *Surface Polaritons—Electromagnetic Waves at Surfaces and Interfaces* (Netherlands: Elsevier) Chaps. 1 and 9
- [104] Pitarke J M, Silkin V M, Chulkov E V, Echenique P M 2007 *Rep. Prog. Phys.* **70** 1
- [105] Bliokh Y P, Felsteiner J, Slutsker Y Z 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 165003
- [106] Wang L, Cao J X, Wang Y, Niu T Y, Liu L, Lü Y 2008 *Chin. Phys. B* **17** 2257

# The current status of surface wave plasma source development

Dong Tai-Yuan<sup>†</sup> Ye Kun-Tao Liu Wei-Qing

(School of Science, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

(Received 15 November 2011; revised manuscript received 26 December 2011)

## Abstract

In this paper, a flat-type surface wave plasma (SWP) source generated by microwave discharge is introduced systematically. The principle of the surface wave plasma is analyzed and the energy absorption mechanism of the surface wave plasma discharge is explored. A novel wave-mode converter composed of the single-mode resonator array, sub-wavelength diffraction grating and a new type of slot antenna array is introduced. The research findings, such as the mechanism of the generation, the realization, the characteristics of plasma parameters and the numerical simulation of the new SWP sources are beneficial to industrial applications, will promote the effectiveness of the microelectronics industry and obtain a new breakthrough.

**Keywords:** surface wave, plasma, surface plasmon polariton, discharging of the microwave

**PACS:** 52.50.Dg, 52.65.Kj, 52.40.Db

<sup>†</sup> E-mail: dongtaiyuan@yahoo.com.cn