文章编号:1007 - 4252(2024)05 - 0005 - 281　　DOI: 10.20027/j.gncq.2024.0034

激光退火技术在分立器件中应用的研究

王　雷
(上海华虹宏力半导体制造有限公司,上海 201203)

摘要:激光退火是一种激活效率高,热预算小,激活深度可控的激活工艺,对具有垂直结构的分立器件进行背面注入退火激活时,可以大大降低热预算,避免背面工艺对正面器件的影响,进一步降低超薄片在加工中因形变导致的翘曲和碎裂。本文以 FS-IGBT 背面注入退火为例,对激光退火工艺参数与激光退火设备硬件参数进行了研究,在传统激光退火理论模型的基础上,首次通过理论分析和实验结果验证了多光束激光退火设备的交叠时间与交叠范围、聚焦光斑尺寸、聚焦深度等重要设备参数对分立器件影响,对激光退火技术在分立器件中的应用与激光退火工艺与激光退火设备标准化及理论模型与实际相结合提供了有益参考。

关键词:激光退火;分立器件;FS-IGBT;多光束激光退火;超薄片
中图分类号:TN305　　**文献标志码**:A

Laser Annealing Technology Application Study in Power Device

WANG Lei
(Shanghai Huahong Grace Semiconductor Manufacturing Corporation, Shanghai 201203, China)

Abstract: Laser Annealing Technology is a doping activation solution with low thermal impact and controlled active depth. It is attractive for Power devices to avoid backside implantation activation impact to both front side device and thin wafers. In previously study some good results had been demonstrated and its theory model is discussed. In this paper, we will demonstrate a systematic study for laser annealing technology application in FS-IGBT. For the first time, some key process and tool parameters are studied beyond current classical theory model. It will be a good reference for laser annealing process/tool setup and maintenance. It also provide a new direction to improve laser annealing model accuracy by considering tool parameter impact

Key words: Laser Annealing; Power Device; FS-IGBT; Multiple Laser Annealing; Thin wafer

0　引言

随着半导体技术和新能源战略产业的不断发展,分立器件尤其功率或高压大电流应用器件的需求越来越迫切。为了获得更好的功率特性、高抗击

收稿日期:2024-06-17;　　**修订日期**:2024-07-18
作者简介:王　雷(1979-),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为集成电路制造、存储功率射频等特色工艺器件的研究和开发(E-mail:wl.wang@hhgrace.com).

穿电压和低导通电阻,功率器件典型如 IGBT,其杂质浓度分布变得越来越复杂,对掺杂杂质激活工艺提出了更高要求。

激光退火作为一种新型退火工艺[1-2],具备激活效率高,热预算小,激活深度可控的显著优点,在需要严格控制热预算和器件尺寸控制非常严格的工艺中先进逻辑工艺中被广泛使用。这一优点对于分立器件需要在背面形成低热预算的可控复杂掺杂激活和兼容薄硅片制程带来了可行性[3-5]。Applied Materials、Hitachi、Veeco、Coherent 等国外公司随之提出了相应兼容薄片制程的多光束激光退火商用设备。2014 年华虹宏力半导体制造有限公司通过和上海微电子装备有限公司联合研发,首次完成基于国产激光退火设备的超薄片 FS-IGBT 的背面杂质激活[6]。

激光退火工艺的理论研究自 J. Feinleib 在 1971 年提出激光与物质相互作用模型[7],技术发展主要集中在激光与半导体材料的相互作用以及激光退火引起的温度分布造成的半导体材料晶格中的热扩散两方面,以此为基础对退火激光波长、能量、频宽、多光束时延等参数进行了研究。后续无论在材料处理、先进逻辑工艺的超浅结应用、分立器件应用尤其超薄片的应用时等至今都遵循此原则。比如 2019 年 K. Huet 等在对激光退火现有理论进行总结,并在此基础上提出的激光退火的商用仿真软件[8],又比如 2022 年刘敏等在讨论激光退火在如何对实现高性能 IGBT 所需的 10Mev P 超高剂量注入进行激活的实验[9]等。而再此之外,现有理论和工艺研究对其他工艺参数尤其硬件参数对分立器件是否会产生影响,以及如何选择激光退火工艺和设备并建立有效的硬件监控和维护等尚缺乏有效理论指导或实验参考。

在本文中,我们以双光束激光退火设备在 FS-IGBT 工艺中的系统性研究为例,对多光束激光退火从关键工艺参数如能量、双光束时延等以及设备硬件参数如激光退火设备的交叠时间与交叠范围、聚焦光斑尺寸、聚焦深度等两方面对分立器件特性的影响做进一步的研究和分析。

1 激光退火工艺理论分析

1.1 传统激光退火工艺理论

传统激光退火工艺研究通常基于激光和材料的相互作用和激光退火引起的温度分布造成的材料晶格中的热扩散两方面来进行。

其中材料对激光的吸收可以简化如公式(1),其中 I_0 为初始光强,z 为激光进入材料的深度方向的位置,α 为材料对该激光波长下的吸收系数[10]

$$I(z) = I_0 e^{-\alpha z} \tag{1}$$

因此激光的光强即能量,激光波长和材料性质以及掺杂杂质决定了吸收率,对于给定的材料和注入杂质,吸收系数基本固定,此时影响激光退火的主要是波长和能量。

进一步考虑激光对材料加热引起的热传导作用,则通过求解热传导方程,可以近似为公式(2)[11]

$$I(T,r,z,t) = \alpha(T)(1-R) I_0 f(r) g(t) e^{-\alpha(T)z} \tag{2}$$

其中 r、t 为空间和时间坐标,R 为材料表面反射率,吸收系数 α 为随温度 T 变化的变量,f(r)、g(t)为激光在空间与时间方向的分布函数。当考虑到采用多个波长的脉冲激光时,要考虑脉冲周期内激光能量随时间的变化以及相邻脉冲之间的相互作用,因此脉冲激光的脉宽和不同脉冲之间的时延成为影响工艺的关键因素。

1.2 传统激光退火工艺理论与实际的差异分析

基于 1.1 所述传统理论分析,激光退火工艺和设备硬件参数通常需要考虑激光的波长、能量、脉宽、延时等参数。但实际真实情况中激光随时间空间的分布、多光束退火时不同波长激光的相互作用、以及硅片对激光的反射与吸收等多方面因素,传统理论近似与真实情况存在差异。

1.2.1 激光退火光束的影响

传统理论中,入射激光的空间时间分布 f(r)、g(t)一般近似简化为随时间变化的高斯光束。

$$f(r) = e^{-2r^2/r_0^2} \tag{3}$$

但实际的商用激光退火设备受到硬件光路和光束整形技术的限制,以及退火均匀性和激光使用效率的考虑,激光退火光束往往并不是传统理论模型中假设的理想高斯光束。其中比较典型的如 Coherent 公司 2008 年提出将高斯光束整形为平顶

高斯光束的匀光方案[12],其光强分布如图 1 所示。后续也持续不断有研究人员提出用新的更复杂的光束整形方案[13-14]。这些光束整形方案就造成了实际在退火光斑有效范围内,光强并不是理想的高斯分布。设备实际形成的光斑形状和整形效果会造成 f(r)的变化并影响激光退火的效果。

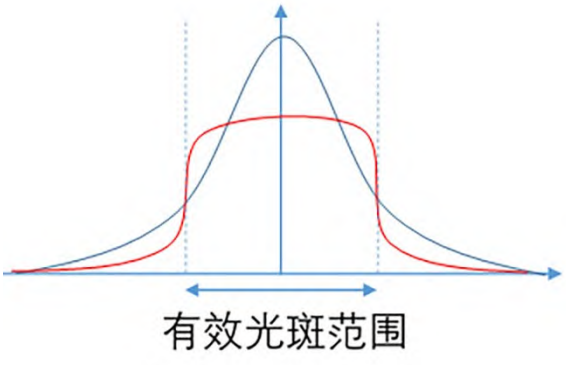

图 1　实际光斑光强分布

Fig. 1 Intensity Distribution of Laser Beam

另一方面考虑到光束整形技术的影响,光强同时存在 z 方向的分布 f(z),而设备一般只能控制最佳焦距处一定范围内光斑分布为理想预设分布,如果硅片不在最佳焦距范围内,则到达硅片表面的离焦光斑的实际光强分布也和假设不一致,从而导致光强和能量密度大大降低,影响退火效果,因此实际情况也必须考虑聚焦深度的影响。

对于多光束退火技术,不同波长的激光光斑需要产生交叠,其交叠区域决定不同波长的激光相互作用,因此光斑交叠方式和范围也是影响激光退火的重要因素。

1.2.2 激光退火光束与硅片的相互作用

传统激光退火理论模型如式(2)所示,把材料表面的反射近似简化为平面光的镜面反射,认为除反射外其他激光能量都可以进入材料并被吸收,但实际中因为激光退火会对表面产生熔融,硅片表面形貌会发生变化[15]。当硅片表面发生较大形貌变化时,传统理论中的镜面反射近似不成立,退火造成的表面形貌会产生漫反射,极大影响后续光束继续进入,造成退火效果变差。同时不平整表面会引起后续制造工艺如背面金属化,导致背面电极很难达到高品质。因此实际生产中,我们也要控制硅片表面形貌,避免形貌发生较大变化而影响后续的退火效果和对后续制造工艺的影响(如背面金属化)。

2　激光退火工艺实验与结果讨论

2.1　实验设定

本文在实验中使用双光束激光退火设备,激光器可以提供两路互相独立的激光光束进行退火,两束激光可以通过设定,实现不同聚焦深度和形成时延实现退火时间和空间上的分离。最大退火能量可以达到 5j/cm^2。配备相应专门设计的薄片运送装置和薄片工件台,可以实现最薄 60 μm 的硅片退火和传输。

为了确定掺杂杂质的激活效果,本文使用扩展电阻法(Spreading Resistivity Profile – SRP)技术作为掺杂杂质浓度、激活率与深度测试手段,载流子浓度/激活率误差<5%,深度测量误差<5%,测量误差满足器件设计需求。

2.2　工艺参数相关实验与结果

2.2.1 激光退火能量的影响

根据现有理论和工艺研究结果,退火能量是最关键的因素,能量越高退火光斑照射局部区域瞬间温度越高,退火越充分。但和科研研究与理论近似可以无限增加退火激光能量不同,实际生产中当激活率达到要求或理论上限后,继续增加退火能量并不能继续提高激活率,反而会随着能量增加,硅片局部温度过高范围过大,会同时引起杂质过度扩散导致的浓度分布失控、温度过高导致正面器件特性变化以及局部应力变形导致的碎片风险提高。因此对于激光退火在基于超薄片的分立器件工艺时,需结合掺杂类型、预设浓度分布和硅片厚度综合确定。

如图 2 所示,注入条件为 B+,40kev,1×10^{14} cm^{-2},纵轴为激活杂质的浓度,单位为 atom/cm^3,横轴为从硅片表面起向内深度,单位微米(后续图纵轴、横轴定义相同,不再赘述)。

当退火能量达到 2.8J 时,杂质浓度已经达到最大且在正确的硅片深度,继续增加能量,杂质进一步向硅片内部产生了扩散,预设位置的杂质浓度不但没有提高,反而下降,造成无论浓度还是位置均不符合器件设计要求。

2.2.1 多光束激光退火时延的影响

根据现有理论和工艺研究结果,对于多光束激光退火,激光时延是另一个关键工艺因素,只有控制

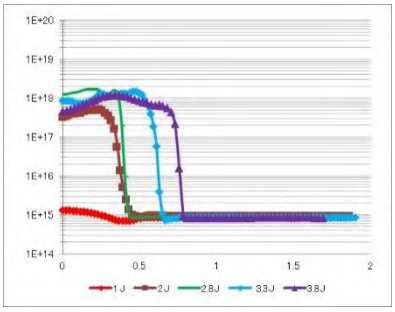

图 2 不同退火能量条件下退火后杂质浓度对比

Fig. 2 Post Laser Anneal Concentration Compare with different Laser Intensity

时延在一个恰当的区间,才能使不同激光同时作用,达到多光束退火效果,使退火效果达到最佳。

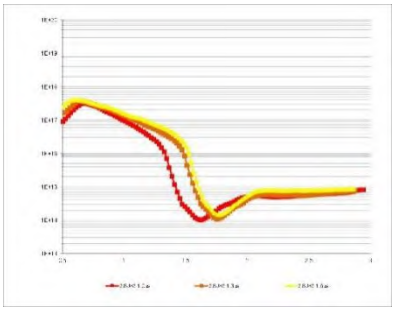

图 3 不同退火延迟退火后杂质浓度对比(双光束能量相同)

Fig. 3 Post Laser Anneal Concentration Compare with different delay between dual laser pulse (Same intensity for dual laser)

如图 3 所示,注入条件为 P+,450kev,1×10^{13} cm^{-2},纵轴为激活杂质浓度,单位为 $atom/cm^3$,退火能量 2.8J。可以看到随着时延变化,掺杂浓度和深度发生了明显变化。对于基于超薄片的分立器件,适当控制时延,不但可以得到有效的掺杂浓度和合适的深度,还可以有效降低硅片退火所需总能量和作用时长,在相同掺杂类型、掺杂浓度和激活率的情况下,总热预算和硅片变形较小,有效发挥双光束退火的优势,避免激光退火局部高温热过程对正面器件的影响,以及有效降低硅片碎片率和内在应力。

2.3 激光退火设备参数相关实验与结果

通过 2.2 所述通过对双光束激光退火的能量、延迟的实验和研究,可以确定激光退火中一系列重要工艺参数,在本节中将结合激光退火设备,研究激光退火设备关键硬件参数对器件的影响。

2.3.1 光斑尺寸与均匀性的影响

如 1.2.1 所述,激光退火光束整形效果决定光斑的形状和光强分布均匀性和强度,因此采用不同整形方案,会产生不同光斑分布,并进而影响退火效果。

如表 1 所示,我们对于不同整形方案产生的光斑 1/2 进行分组时延,光斑 1 尺寸较大,光强分布较差,光斑 2 尺寸较小,光强分布相对均匀。注入条件为 B+,40kev,1×10^{14} cm^{-2},退火能量 1/2 设定为2.6 J/3J。实验结果如图 6 所示。

表 1 不同光斑、能量组合与分批实验表

Table1 Split table with different intensity and beam spot

	光斑 1	光斑 2
能量 1	DOF1-1	DOF2-1
能量 2	DOF1-2	DOF2-2

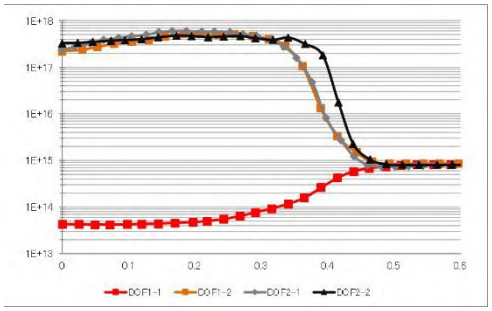

图 4 不同光斑退火后杂质浓度对比

Fig. 4 Post Laser Anneal Concentration Compare with different intensity and beam spot

图 4 所示,两种尺寸大小与均匀性不同的光斑,其对应的杂质退火效果也有明显差异。对于光斑尺寸更小,更均匀的分组,有效激活能量和激活深度都要更佳。

2.3.2 聚焦深度的影响

如 1.2 所述,激光光束聚焦深度以及焦点进入硅片的深度会影响实际激光退火效果。如图 5 所示,注入条件为 B+,40kev,1×10^{14} cm^{-2},P+,450kev,1×10^{13} cm^{-2},随离焦距离杂质激活率会有明显差异。B 激活率从 48.7% -69.2%,P 激活率从 71.5% -88.5%。当控制离焦深度在 0-100 微米时,B 激活率可以控制在 53.8% -58.3%,P 激活率可以控制在 71.5% -79.6%。控制一个恰当的聚焦深度,可以保持激活率充分和稳定。

为了精确控制聚焦深度和退火深度,退火设备需要在硬件上具备稳定的 Z 向控制和光学聚焦系统稳定性,激光退火设备无论在设备设计、制造、验收阶段还是日常检测和维护中,都需要考虑这两方面。

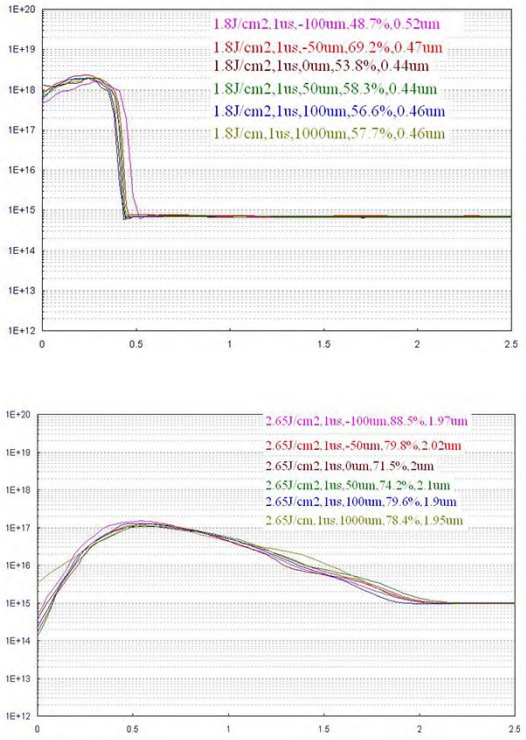

图 5　不同聚焦条件退火后形成的杂质浓度分布

Fig. 5 Post Laser Anneal Concentration Compare with different Focus

2.3.3 光束交叠的影响

双光束激光退火前后两束激光的交叠也有重要影响,和时延共同决定双光束作用的空间和时间,不但影响退火效果,同样对表面形貌产生影响。通过控制交叠和时延可以有效修复硅片表面因退火时局部区域熔融形成的表面凹凸不平,使后续制造步骤如背面金属电极形成更容易完成。

如图 6 所示,注入条件为 B+,40kev,1×10^{14} cm^{-2},退火能量 2.6J,交叠面积从 28×80 mm 变化到 28×180 mm,交叠率从 67%-80%,延迟时间从 0.2 微秒-2 微秒,可以看到在双光束交叠没有优化的情况下,退火后表面会产生明显的条纹,而通过优化交叠条件,可以使硅片表面和退火前基本一致,不会出现条纹状起伏。

基于上述研究,激光退火设备除常规硬件参数

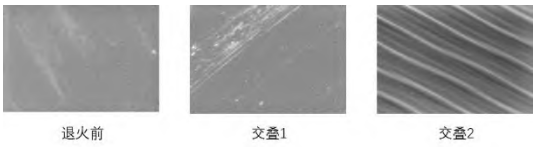

图 6　不同双光束退火交叠设置退火后硅片表面状态对比

Fig. 6 Post Laser Anneal Wafer Surface Compare with different Overlay of dual laser beam

如激光器输出能量、脉宽、时延稳定性,设备工件台运动精度与稳定性等需要做设备验收、日常检测与维护外,对聚焦光斑尺寸和形状、聚焦深度、交叠精度等可以引起激光退火结果有较大变化的硬件参数如和其对应的硬件部分,也需要做控制。

3　结论

本文以 FS-IGBT 为例,在传统激光退火理论模型的基础上,首次验证了多光束激光退火设备的交叠时间与交叠范围、聚焦光斑尺寸、聚焦深度等重要设备参数对分立器件影响,明确了多光束激光退火设备的交叠时间与交叠范围、聚焦光斑尺寸、聚焦深度等重要设备参数的硬件控制要求,为国内激光退火设备的自主研发应用和系统验收与日常维护规范提供了有益参考。

本文针对传统工艺和理论中均匀高斯光束、镜面反射、完全吸收等假设,结合设备实际情况,研究了多光束激光退火设备的交叠时间与交叠范围、聚焦光斑尺寸、聚焦深度等对激光退火效果的影响,发现传统激光退火理论模型需要考虑上述因素的影响才能取得与实际更接近的结果,这为激光退火理论模型结合实际设备情况进一步优化提供了思路。

参考文献:

[1] J. Venturini, Integration of a long pulse laser thermal process for ultra shallow junction formulation of CMOS devices. [C], 12th IEEE international conference of Advanced Thermal processing of Semiconductors, pp. 73-78.

[2] V. Gonda, Near-ideal implanted shallow-junction diode formation by excimer laser annealing. [C] Proceeding of 13th IEEE RTP 2005, pp. 93-100.

[3] Y. Arai, et. al., Backside-activation technique of power device IGBTs by a microsecond-pulsed green laser, [C] Proceeding of 17th IEEE RTP 2009.

[4] M. Rahimo, C. Corvasce, J. Vobecky, et. al, Thin-Wafer Silicon IGBT with advanced laser annealing and Sintering Process, [J] IEEE Electronic Device Letters, 2012, Vol33, No11, pp1601-1603

[5] F. J. Niedernostheide, et. al., Progress in IGBT development, [J] IET Power Electron. 2018 Vol11 Iss.4, pp646-653

[6]雷海波,肖胜安,童宇峰 激光退火工艺在绝缘栅双极型晶体管的应用 [J] 半导体技术 2014 vol39, 6, pp435-437.

[7] J. Feinleib, et. al., Rapid reversible light induced crystallization of amorphous semiconductor. [J] Applied Physics Letters 1971, 18(6): 254-257

[8]K. Huet, et. al., Laser Thermal Annealing for low thermal budget applications: from contact formation to material modification. [J] ECS Transactions 2019, 89(3): 137.

[9]刘敏等,硅晶圆中注入 10Mev P 的连续激光退火激活,[J],激光与红外, 2022 52(7), 1000-1003

[10]陆建,倪效武,贺安之,激光与材料相互作用物理学[M],机械出版社,1996

[11] G. Ming, et. al., Time resolved temperature field of monocrystalline silicon irradiation by a millisecond pulse laser. [J] Journal of Applied Mechanics and Technology Physics 2017, 58(4): 693-701

[12] N. Misra, et. al., Pulsed Laser annealing of semiconductor structures for functional devices, [J] Physics Status Solidi. 2008, 5(10), 3264-3270.

[13]H. sakai, et. al., Designing diffractive arbitrary shaped top-hat beam in non-paraxial systems. [J] SPIE 11306J, 2020

[14] MS Li, C Fumeaux, W Withayachumnankul, Terahertz Beam Shaping: Gaussian to Flat-top Beam Conversion Through Tri-layer Meta surface. [C] 47th IRMMW-THz, 2022, Delft, Netherlands

[15]T. Gutt, et. al., Deep melt activation using laser thermal annealing for IGBT thin wafer technology. [C] Proceedings of The 22nd International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs, pp. 29-32.