

# a-Si:H薄膜的制程沉积温度对a-Si:H/SiN<sub>x</sub>:H薄膜层的热稳定性的影响

黄建中<sup>1</sup>、黄彦棠<sup>2</sup>、曾奕文<sup>2</sup>、  
陈文华<sup>1</sup>、方婷<sup>1</sup>、李济群<sup>1</sup>、  
蔡娟娟<sup>2</sup>

<sup>1</sup>台湾茂迪公司；<sup>2</sup>台湾交通大学

此技术文章选自第十期印刷版《Photovoltaics International》季刊

## 摘要:

将氢化的非晶硅(a-Si:H)薄膜覆盖上一层氮化硅(SiN<sub>x</sub>:H)薄膜,并在薄膜沉积后加以热退火处理,可有效地强化硅片表面的钝化作用。在这个实验里,我们将讨论不同的a-Si:H薄膜制程沉积温度对a-Si:H/SiN<sub>x</sub>:H薄膜层的热稳定性的影响,及可能的相关机制。我们利用载子生命周期测量及低掠射角的XRD来研究a-Si:H/SiN<sub>x</sub>:H薄膜层的热稳定性,并试着以SiH<sub>2</sub>键结的密度及观察到的硅磊晶相来解释。利用适度的热处理制程,在沉积温度为130°C的a-Si:H薄膜上覆盖SiN<sub>x</sub>:H薄膜之后,其钝化效果表现的比a-Si:H(200°C)/SiN<sub>x</sub>:H薄膜层来的好。倘若在过度的热处理下,其载子生命周期的衰减却是比较严重的。含有较多SiH<sub>2</sub>键结成份的a-Si:H(130°C)/SiN<sub>x</sub>:H薄膜层,可能被视为能够提供较多的氢原子以进行交换反应,然而另一方面的问题却是,其硅磊晶相的形成也将更为容易。

## 前言

电网平价(grid parity)的目标引领着太阳能硅片朝向厚度更薄的研究与发展,这也是全球太阳能产业对于节省成本一致的目标。然而过薄的太阳能电池却会造成低效率的可能性,这是因为更多的光将能够来到太阳能电池的背表面,而这也是许多硅片捕捉光点的位置(trapping sites)。这包含了硅片缺陷(defects)及表面悬浮键(dangling bonds),而这将造成硅片内部产生的光电流载子被轻易的再结合(recombination)而减损[1]。因此,为改善较薄的太阳能电池的效率,具有好的表面钝化(surface passivation)效能来降低载子在表面再结合的发生是十分重要的,尤以电池的背表面钝化更为重要。热成长的二氧化硅(SiO<sub>2</sub>)薄膜能够提供非常好且具热稳定性的钝化作用,然而其制程需要长时间且高能量高温度的制备过程,这对于太阳能电池的大量生产是不合适的[2]。再者,这种高温制程也会对多晶硅芯片带来极大的伤害[3, 4]。考虑到避免硅片质量的衰减,使用低温制程来沉积薄膜便是最好的选择。利用电浆化学气相沉积(PECVD)来制作氮化硅(SiN<sub>x</sub>:H)薄膜,通常只需要300°C到400°C的低温环境。此能提供很好的钝化效果,但其热稳定性却比不上二氧化硅薄膜[5~7]。再者,在p型的太阳能电池背表面沉积含氮量较多的氮化硅薄膜,其在硅晶元表面产生的微弱反转(inversion)层,会使得薄膜与电极接触的位置有漏电流的生成[8]。当氮含量减少使得氮化硅薄膜成为含硅量较多的成份结构时,整体的漏电现象及缺陷密度将大幅的减少。一个很极端的例子是,当所有的氮元素都被

移除后,所形成的非晶硅(a-Si:H)薄膜拥有最低的缺陷密度[9]。这便是氢化的a-Si:H薄膜所具备的许多优点之一。

首先,这个钝化薄膜层是以200°C到250°C的PECVD系统所沉积制程而得,这个相对较低的温度不仅只降低制程能量的消耗,也减轻了因为高温下杂质的扩散所造成的硅片的质量衰减。再者,a-Si:H薄膜可以达成与二氧化硅薄膜一样的低表面再结合速率[10],且不会有本质漏电的现象产生。因此,利用a-Si:H薄膜作为表面钝化层,是制作高效率太阳能电池的很好选择。

**“在本实验里,我们采用5-6 Ωcm硼掺杂的p型Cz晶圆,用来沉积薄膜制作样品并量测载子的生命周期。”**

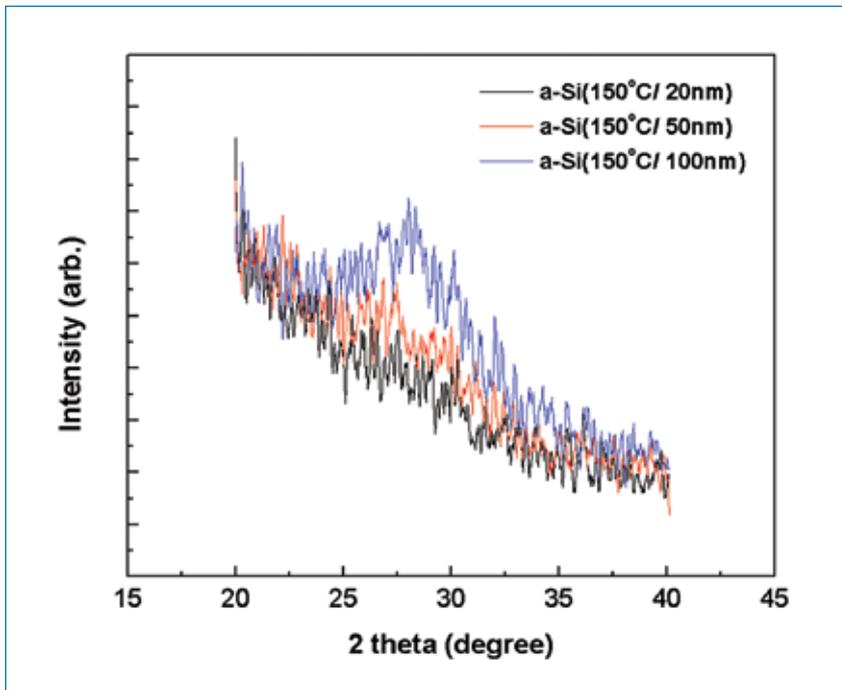
即便a-Si:H薄膜有上述的许多优点,其在应用上仍存在亟待解的问题。a-Si:H薄膜的钝化效果很容易受到太阳能电池制程中的高热影响,诸如传统制程中的金属退火过程或金属浆料网印后的烧结所带来的高温制程等。许多针对如何增进a-Si:H薄膜热稳定性的研究,如Plagwitz[11]与Bentzen[12]讨论了SiN<sub>x</sub>:H薄膜覆盖在a-Si:H薄膜上加强了表面钝化作用的热稳定性。而根据这项发现,S.Gatz[13]的研究指出a-Si:H/SiN<sub>x</sub>:H薄膜层热稳定性的提升可藉由增加SiN<sub>x</sub>:H薄膜的制程温度,由300°C提高到400°C以提升该薄膜的密度。

在本研究中,提出了几个增加a-Si:H/SiN<sub>x</sub>:H薄膜层热稳定性的讨论,其中所使用的SiN<sub>x</sub>:H薄膜沉积温度是450°C。研究结果不仅确认了a-Si:H薄膜加上SiN<sub>x</sub>:H薄膜的覆盖可增进其热稳定性,也针对改变不同a-Si:H薄膜的制程沉积温度,所对应a-Si:H/SiN<sub>x</sub>:H薄膜层热稳定性的变化进行了深入的探讨。

## 实验内容

在本实验里,我们采用5-6 Ωcm硼掺杂的p型Cz晶圆,用来沉积薄膜制作样品并量测载子的生命周期。我们使用KOH的蚀刻溶液来制作亮面的晶圆表面,并在薄膜沉积之前用低浓度的HF溶液做清洗处理。接着以H<sub>2</sub>及SiH<sub>4</sub>为制程气体的27.12MHz PECVD用来沉积a-Si:H薄膜,并沉积覆盖上以NH<sub>3</sub>及SiH<sub>4</sub>为制程气体的SiN<sub>x</sub>:H薄膜层。所有的样品其两面都有沉积薄膜层a-Si:H/SiN<sub>x</sub>:H,而SiN<sub>x</sub>:H薄膜的制程条件为450°C/80nm,a-Si:H薄膜则为110~200°C/20~100nm。然而,为了能够量测到a-Si:H薄膜在不同的温度制程下所呈现的不同结晶程度,我们采用面积为1cm<sup>2</sup>的样品来进行X光绕射仪(XRD)的量测。

首先,选用20nm、50nm及100nm三种厚度的a-Si:H样品进行低掠射角XRD的量测,进而决定具有足够结晶讯号的薄膜厚度。在选定a-Si:H薄膜的样品厚度之后,针对变更实验制程温度及后续的快速热退火(RTA)温度所对应的结晶程度变化,也利用XRD进行探讨。同时,在亮面晶圆上所制成的样品则用micro-PCD来进行少数载子生命周期的量测。



图一：XRD图谱。以150°C沉积在p型(100)的抛光硅片上而得的非晶硅薄膜，厚度分别有20nm、50nm及100nm。

## 结果与讨论

### XRD的厚度相依性

如图一所示，a-Si:H薄膜在(111)的绕射晶相出现在28度角的位置，且其讯号随着厚度的增加逐渐明显。其中100nm厚度呈现出微弱的讯号，这显示其结晶现象虽然存在但仍不够显著。因此，后续样品对a-Si:H薄膜厚度的选用决定在100nm，除了是因为其在XRD图谱中展现了结晶的行为，再者是100nm在钝化的表现上也有不错的效果。J. Mitchell[14]在a-Si:H薄膜上的研究成果显示，200nm的厚度已经造成了钝化的负面效果，而100nm却会带来较佳的结果。这个原因可从FTIR图谱中观察到较多氢原子存在，是源自于SiH (monohydrides)与SiH<sub>2</sub> (dihydrides)两种分子所呈现的明显讯号。

### 载子生命周期与XRD的温度相依性

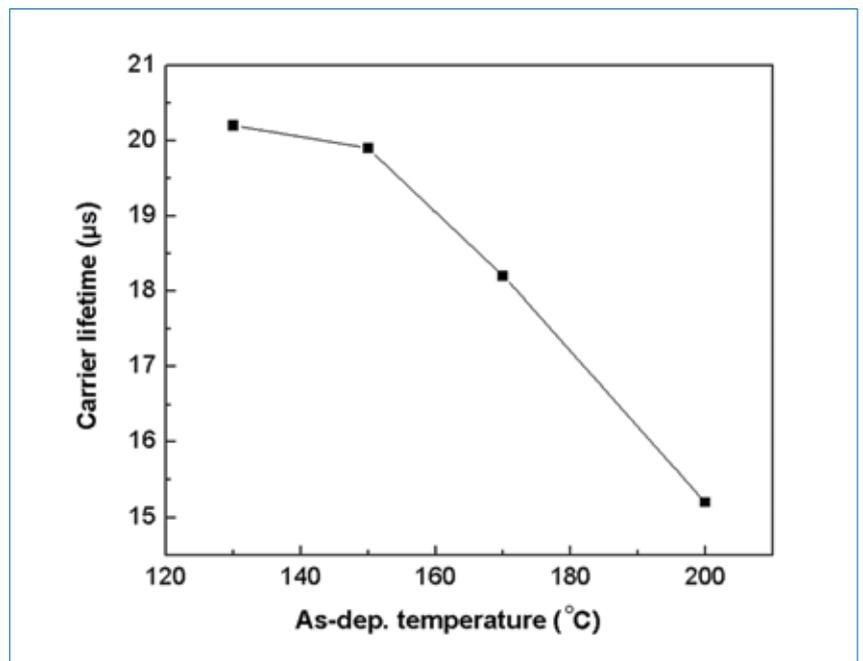
a-Si:H薄膜在不同热处理下的晶相变化，及其对a-Si:H/SiN<sub>x</sub>:H薄膜层所造成的热稳定性影响也是探讨的方向。T. H. Wang[15]也在p型硅片上沉积a-Si:H薄膜，对所形成的异质结(heterojunction)特性进行了研究。其结果指出a-Si:H薄膜的晶相变化对SHJ(silicon-heterojunction)太阳能电池的效能表现有很大的影响，在超过特定的热处理条件下，硅原子的磊晶层将很容易在接口生成，因此a-Si:H薄膜在低温沉积的环境下(在(100)硅片上小于150°C，而在(111)硅片上小于200°C)将有利于较佳的异质结形成。对于在四种沉积温度

较高的沉积温度所造成异质结的微弱磊晶生成，应该不是造成载子生命周期表现差异的主因。而130°C的沉积温度比起200°C会生成含有较多SiH<sub>2</sub>键结(dihydride-rich)的a-Si:H薄膜，因此较多的氢原子在薄膜沉积过程中与硅片内部(bulk silicon)所进行的交换反应，可能是造成较佳钝化效果的主因之一。就一般的FTIR(红外光谱)结果来看，130°C沉积的a-Si:H薄膜所对应的SiH<sub>2</sub>键结比例，是170°C的沉积条件下的1.5到2倍左右，因此含较多SiH<sub>2</sub>键结的薄膜也具备了较多且较微弱的Si-H键结，这便使得在表面钝化作用时其所需的热活化能量较少，也因此钝化制程所需的氢原子交换反应将更容易进行。J. Mitchell[1]的研究结果则指出，利用FTIR观察a-Si:H薄膜在热退火处理前后的SiH<sub>2</sub>键结变化，在有效的热处理条件下，对应SiH<sub>2</sub>键结数目的讯号强度会明显减弱。这显示有效的氢原子钝化反应，该交换作用会发生在已存在于异质结附近的SiH<sub>2</sub>键结，而SiH<sub>2</sub>键结中的Si-H键是较容易使氢原子脱离分出的。因此SiH<sub>2</sub>键结在热作用下，便会结构性的转变为SiH键结甚或是单晶Si的键结，进而造成SiH<sub>2</sub>键结在FTIR讯号上的转弱。故而，对于含较多SiH<sub>2</sub>键结的a-Si:H薄膜，其在沉积制程的过程中，SiH<sub>2</sub>便扮演着促进氢原子交换之钝化反应的居中要件。

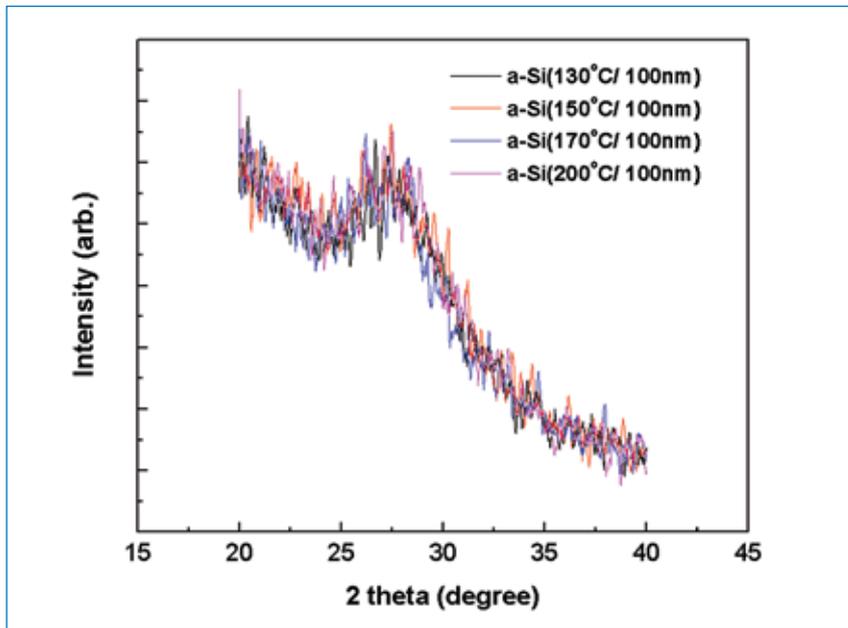
### a-Si:H薄膜的热稳定性

其它文献[12]指出，a-Si:H/SiN<sub>x</sub>:H薄膜层在沉积制程后进行热退火处理，可以明显的提升表面钝化的

130/150/170/200°C所制作的a-Si:H薄膜样品，我们利用micro-PCD进行少数载子生命周期的量测。如图二所示，随着越低的沉积温度可得到越佳的钝化效果，而这个结果与T. H. Wang[15]的研究是一致的。而从图三所示的XRD图谱，并没有如预期的在高温条件下，观察到a-Si:H磊晶层生成所对应的(111)晶相讯号。这可能是因为沉积温度介于130°C到200°C所对应的晶相变化是比较微弱的，因而不足以在XRD的图谱中显示出来。因此推论，在



图二：少数载子生命周期量测结果。厚度为100nm的非晶硅薄膜以130°C、150°C、170°C及200°C沉积于p型(100)的亮面Cz硅芯片上。



图三：XRD图谱。厚度为100nm的非晶硅薄膜以130°C、150°C、170°C及200°C沉积于p型(100)的抛光硅片上。

效果。倘若将a-Si:H/SiN<sub>x</sub>:H薄膜层加入传统太阳能电池作为背表面钝化层，则在经过后续的高温电极烧制程后，将会造成电池效能的衰减。为研究这个议题，我们在薄膜沉积制程后，在氢气与氮气的结合气体环境下利用RTA(频谱分析)制程，进而探讨该样品的热稳定性。我们选定两个a-Si:H薄膜的制程温度，130°C与200°C，欲了解是否会对a-Si:H/SiN<sub>x</sub>:H薄膜层的热稳定性造成影响。图四显示了三种样品经由五分钟的RTA处理后，在不同的环境温度下，各自对应的载子生命周期变化，样品条件为单层薄膜a-Si:H(130°C/100nm)，双层薄膜a-Si:H(130°C/100nm)/SiN<sub>x</sub>:H(450°C/80nm)，及双层薄膜a-Si:H(200°C/100nm)/SiN<sub>x</sub>:H(450°C/80nm)。在没有SiN<sub>x</sub>:H薄膜覆盖的状况下，单层薄膜a-Si:H在150°C退火前后的载子生命周期并无变化，而在250°C与350°C的退火温度下，却会对载子的生命周期造成很明显的削减。

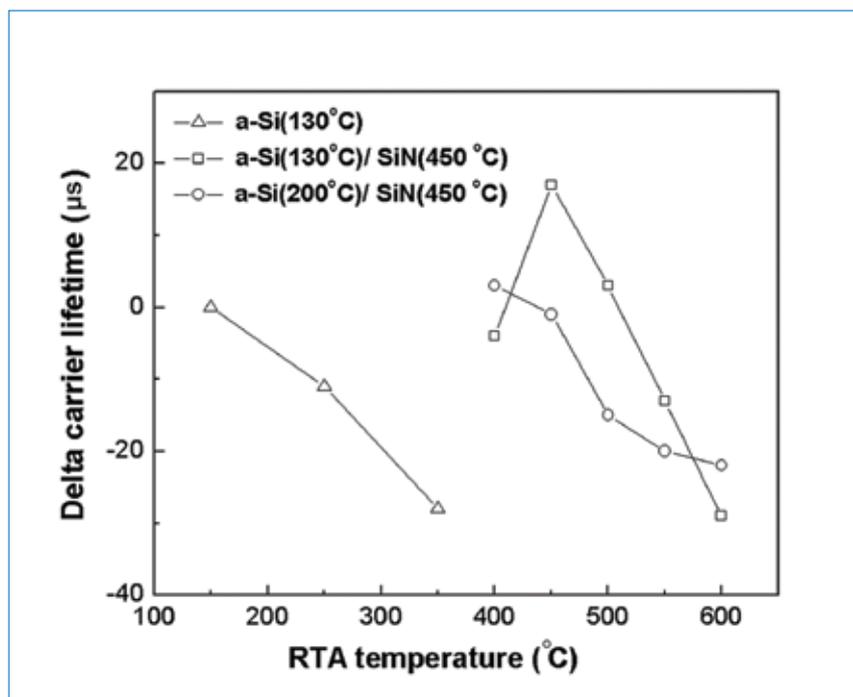
**“a-Si:H/SiN<sub>x</sub>:H薄膜层在沉积制程后进行热退火处理，可以明显的提升表面钝化的效果。”**

这显示从a-Si:H薄膜层所提供的氢原子，在热作用下不仅会朝硅片内扩散，同时也会向外扩散离开薄膜样品。当后续的热退火温度大于薄膜的制程沉积温度时，氢原子向外扩散的行为将更为显著，这使得硅片表面的硅断键无法

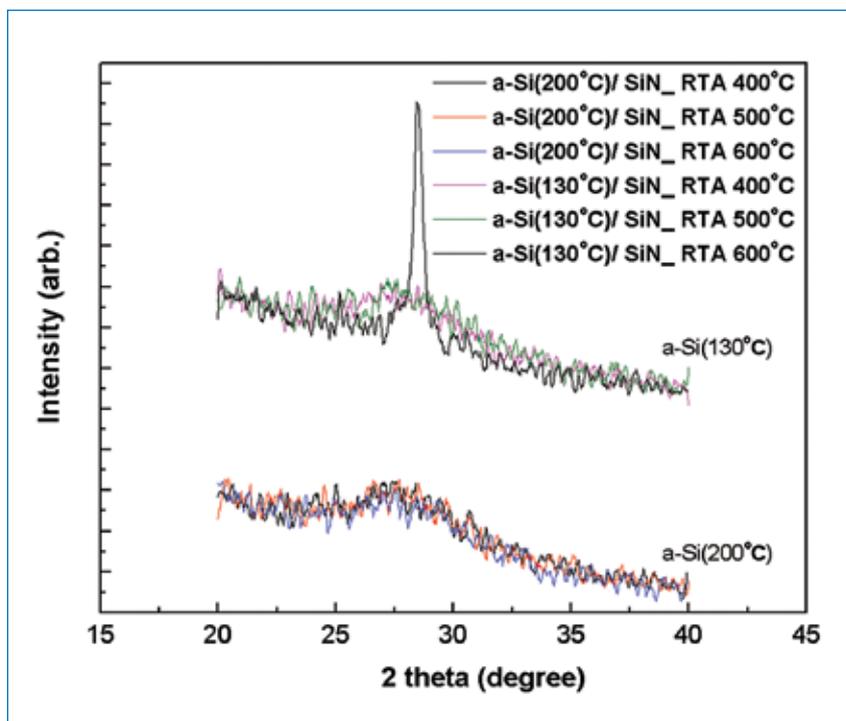
经由钝化而被填充。除了与退火温度相关之外，退火的持续时间也是重要的因素之一。在我们先前的研究经验，单层的a-Si:H薄膜在130°C、150°C与170°C三种制程温度下，经由后续250°C三分分钟的RTA作用后，载子生命周期都可以达到两倍以上改善效果。因此，即使退火温度大过于制程沉积温度，仍旧可藉由控制适当的热量预算，来达成有效的热退火处理。今后，研究寻找最佳化的退火持续时间，也是未来的工作重点之一。

### a-Si:H/SiN<sub>x</sub>:H薄膜层的热稳定性

利用SiN<sub>x</sub>:H薄膜做为a-Si:H薄膜的覆盖层，将使得更多的氢原子往硅片内部扩散，进而提升表面的钝化成效。当使用的退火温度低于SiN<sub>x</sub>:H薄膜的制程沉积温度400°C时，a-Si:H(130°C)/SiN<sub>x</sub>:H与a-Si:H(200°C)/SiN<sub>x</sub>:H在载子生命周期的变化上展现了相近的结果，这可能是因为不充分的热活化能所致。J. Mitchell [1]研究了氢原子在钝化反应中的热活化能大小，了解到在单层a-Si:H薄膜的系统中，使用接近该薄膜制程沉积温度作为热退火温度，将可加速氢原子的活化反应。而在我们的实验样品a-Si:H/SiN<sub>x</sub>:H薄膜层中，SiN<sub>x</sub>:H薄膜层的制程沉积温度将决定了热活化能的大小。因此，a-Si:H薄膜的热活化能会因为SiN<sub>x</sub>:H薄膜沉积覆盖之后有了改变。在使用450°C的退火温度后，a-Si:H(130°C)/SiN<sub>x</sub>:H薄膜层展现了较佳的载子生命周期改善效果。如上文所讨论的，这可能是因为沉积温度为130°C的a-Si:H薄膜具备较多的SiH<sub>2</sub>键结所致。此外，450°C的退火温度也与SiN<sub>x</sub>:H薄膜的制程沉积温度相当，因此SiN<sub>x</sub>:H薄膜里的氢原子可轻易的活化反应，并能顺利地与a-Si:H薄膜内的氢原子作交换，进而达到钝化作用的效果。由此推论，a-Si:H/SiN<sub>x</sub>:H薄膜层在热退火作用下的效益原理，不仅与SiN<sub>x</sub>:H薄膜的制程沉积温度所决定的热活化能相关，也需要多数源自于SiN<sub>x</sub>:H薄膜里的氢原子。



图四：RTA前后的少数载子生命周期变化结果。涵盖以下三种样品：c-Si/a-Si:H(130°C/100nm)、c-Si/a-Si:H(130°C/100nm)/SiN<sub>x</sub>:H(450°C/80nm)及c-Si/a-Si:H(200°C/100nm)/SiN<sub>x</sub>:H(450°C/80nm)。



图五：XRD图谱。130°C及200°C沉积的a-Si:H薄膜，其a-Si:H/Si<sub>x</sub>:H薄膜层在RTA 400°C、500°C及600°C下的对应结果z

当退火温度超过500°C之后，a-Si:H(130°C)/Si<sub>x</sub>:H薄膜层的载子生命周期随着退火温度的增加而急速下降。从图五的XRD(X射线衍射)图谱可知，唯一的a-Si:H(130°C)/Si<sub>x</sub>:H薄膜层样品在退火温度达到600°C时，观察到很明显的硅结晶相在a-Si:H薄膜里产生。此即解释了当退火温度从500°C来到600°C的过程中，造成载子生命周期急速下降的原因。至于a-Si:H(200°C)/Si<sub>x</sub>:H薄膜层在退火温度介于500°C到600°C之中，其载子生命周期的下降程度表现的比较平缓，这个结果也与其在XRD图谱中并无观察到明显的结晶相形成相符。因此，在过度的热退火处理下所造成载子生命周期的下降，与a-Si:H薄膜硅结晶相的形成，便有了合理的相关性论证。再者，考虑到SiH<sub>2</sub>键结对氢原子在热交换过程中的重要角色，即使含多数SiH<sub>2</sub>键结的a-Si:H薄膜可以产生较佳的表面钝化成效，然而，在过度的热能制程环境下，硅晶相的形成也将更为容易。

上述解释了在不同的热处理条件下，其所造成的不同载子生命周期的原理，可以合理的以硅晶相的形成来解释，然而，未来将着重几个制程改善以利薄膜层的特性最佳化。首先，对于Si<sub>x</sub>:H薄膜的改善可尽量避免电浆制程时在a-Si:H薄膜上造成的伤害，并增加Si<sub>x</sub>:H薄膜内的氢含量进以降低整体的热活化反应能量。再者，将更仔细的控制整个实验环节的热能预算架构，以避免不足或过度的热处理作用。

## 结论

对于单层a-Si:H薄膜而言，130°C的低温制程沉积可得到较佳的载子生命周期，这可归咎其较多SiH<sub>2</sub>键结的成分结构，故而提供了较多的氢原子，进以降低氢原子钝化作用时所需的热活化能。比较起来，a-Si:H/Si<sub>x</sub>:H薄膜层会有更高的表面钝化效能，且藉由适当的热处理(450°C/五分钟)可进一步的改善载子生命周期。对于a-Si:H(130°C)/Si<sub>x</sub>:H薄膜层在电性效能上更显著的改善，其作用原理与含较多SiH<sub>2</sub>键结的薄膜所提供的氢原子以增进表面钝化作用是一致的。再者，a-Si:H薄膜的热活化能由其制程沉积温度所决定，而当覆盖一层Si<sub>x</sub>:H薄膜后，整体薄膜层的热活化能将改变为与Si<sub>x</sub>:H薄膜的制程沉积温度有所相关。当a-Si:H(130°C)/Si<sub>x</sub>:H薄膜层处在过度的热退火制程时(600°C/五分钟)，其载子生命周期将急速的下降，这也从XRD图谱观察到硅晶相的形成而得到论证。因此，即便SiH<sub>2</sub>键结能够有利于表面钝化效能的提升，在过度的热能制程环境下，硅晶相的形成也将更为容易。

## 鸣谢

作者由衷感谢台湾交通大学光电系的蔡娟娟教授、其博士生黄彦棠及硕士生曾奕文，协助提供非晶硅薄膜沉积的PECVD系统，及许多珍贵的意见与建议。

## 参考文献

- [1] Jonathon Mitchell, Daniel Macdonald, and Andres Cuevas, "Thermal activation energy for the passivation of the n-type crystalline silicon surface by hydrogenated amorphous silicon", *Applied Physics Letters*, 94 (2009) pp. 162102.
- [2] Glunz SW, Grohe A, Hermle M, Hofmann M, Janz S, Roth T, Schultz O, Vetter M, Martin I, Ferré R, Bermejo S, Wolke W, Warta W, Preu R, Willeke G. "Comparison of different dielectric passivation layers for application in industrially feasible high-efficiency crystalline silicon solar cells", *Proceedings of the 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Barcelona, Spain (2005) pp. 572-577.
- [3] D. Macdonald and A. Cuevas, "The trade-off between phosphorus gettering and thermal degradation in multicrystalline silicon", *Proceedings of the 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, UK (2000) pp. 1707-1710.
- [4] O. Schultz, S. Riepe, and S. W. Glunz, "Influence of high temperature processes on multicrystalline silicon", *Solid State Phenomena*, 95-96 (2004) pp. 235-240.
- [5] Ma'ckel H, Lüdemann R. "Detailed study of the composition of hydrogenated Si<sub>x</sub> layers for high-quality silicon surface passivation", *Journal of Applied Physics*, 92 (2002) pp.2602-2609.
- [6] Romijn IG, Soppe WJ, Rieffe HC, Burgers AR, Weeber AW., "Passivation mc-Si solar cells using Si<sub>x</sub>:H: from magic to physics", *Proceedings of the 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Spain (2005) pp. 1352-1355.
- [7] Chen F, Romijn I, Weeber A, Tan J, Hallam B, Cotter J., "Relationship between PECVD silicon nitride film composition and surface and edge passivation" *Proceedings of the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Italy (2007) pp. 1053-1060.
- [8] Dauwe S, Mittelsta'dt L, Metz A, Hezel R., "Experimental evidence of parasitic shunting in silicon nitride rear surface passivated solar cells", *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 10 (2002) pp. 271-278.
- [9] Robertson J., "Defects and hydrogen

- in amorphous silicon nitride”, Philosophical Magazine B (Physics of Condensed Matter, Electronic, Optical and Magnetic Properties) 69 (1994) pp. 307–326.
- [10] T. Lauinger, J. Schmidt, A.G. Aberle, and R. Hezel, “Record low surface recombination velocities on 1Ωcm p-silicon using remote plasma silicon nitride passivation”, Appl. Phys. Lett., 68 (1996) pp. 1232.
- [11] H. Plagwitz, Y. Takahashi, B. Terheiden, and R. Brendel, “Amorphous Si/SiN double layers: A low temperature passivation method for diffused phosphorus as well as boron emitters”, Proceedings of the 21st European Photovoltaic Solar Energy Conf., (2006), pp. 688
- [12] A. Bentzen, A. Ulyashin, A. Suphellen, E. Saunar, D. Grambole, D. N. Wright, E.S. Marstein, B. G. Svensson, and A. Holt, “Surface Passivation of Silicon Solar Cells by Amorphous Silicon/Silicon Nitride Dual Layers”, Proceedings of the 15th International Photovoltaic Science & Engineering Conference, (2005), pp. 316.
- [13] S. Gatz, H. Plagwitz, P.P. Altermatt, B. Terheiden, and R. Brendel, “Thermally stable surface passivation by a-Si:H/SiN double layers for crystalline silicon solar cells”, Proceedings of the 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Spain, (2008), pp. 1033-1035.
- [14] J. Mitchell, D. Macdonald, A. Cuevas and J. Cornish, “Electronic and structural properties of amorphous silicon on crystalline silicon wafers”, Proceedings of the 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Barcelona, Spain (2005) pp. 1004–1007.
- [15] T.H. Wang, E. Iwaniczko, M.R. Page, D.H. Levi, Y. Yan, V. Yelundur, H.M. Branz, A. Rohatgi, and Q. Wang, “Effective interfaces in silicon heterojunction solar cells”, Proceedings of the 31th IEEE Photovoltaic Solar Energy Conference, Orlando (2005) pp. 955–958.

### 关于作者

**黄建中**在茂迪公司任职逾一年，目前是研发部门的成员之一。在加入茂迪之前，曾在台积电公司研发部门有三年的工作经验。其在2006年于清华大学(台湾)取得物理硕士学位。

**黄彦棠**是台湾交通大学光电系博士生。他主要研究领域是非晶硅薄膜太阳能电池及HIT太阳能电池。

**曾奕文**是台湾交通大学光电系硕士生。他目前的研究内容为非晶硅材料及HIT太阳能电池。

**陈文华**于两年前加入茂迪公司研发部门，在这之前，曾在台积电公司产品部门有三年的工作经验。他的化工硕士学位是在2005年于台湾成功大学取得。

**方婷**在2007年于清华大学(台湾)取得材料科学与工程博士学位。她在毕业后加入茂迪公司研发部门至今三年。

**李济群**于台湾大学取得物理学士学位，并在普林斯顿大学取得电机工程硕士及博士学位。他在2000年到2008年任职于Lucent Technologies and Alcatel-Lucent，并在那之后加入茂迪公司至今。

**蔡娟娟教授**在1978年于芝加哥大学取得物理博士学位。她目前是台湾交通大学光电系教授，研究领域涵盖非晶硅及多晶硅材料与太阳能电池，以及TFT-LCD科技。