

**Н.К. Толочко**

## Лазерное структурное модифицирование поверхности материалов

Лазерная обработка материалов находит широкое применение в различных областях техники благодаря достижению существенных эффектов модифицирования поверхности. В разных методах обработки, а также в одном и том же методе, но при разных условиях обработки эффекты модифицирования могут проявляться различным образом, что важно учитывать на практике.

Эффекты структурного модифицирования в значительной мере определяются энергетическими параметрами лазерной обработки. Количество энергии, выделяющейся в материале в результате поглощения лазерного излучения, определяется формулой  $E_d = AE$ , где  $A$  – коэффициент поглощения излучения,  $E$  – энергия излучения, подводимого к поверхности. В случае импульсного излучения  $E = P_u t_u \pi d^2 / 4$ , где  $P_u$  – плотность мощности излучения в импульсе,  $t_u$  – длительность импульса,  $d$  – диаметр лазерного пятна; в случае непрерывного излучения  $E = P \pi d^2 / 4 v$ , где  $P$  – плотность мощности излучения,  $v$  – скорость движения лазерного луча (предполагается, что лазерное пятно имеет форму круга площадью  $S_l = \pi d^2 / 4$ ).

При импульсной обработке производится последовательное наложение на поверхность единичных пятен, т.е. обход по заданному контуру с шагом  $H$ . При этом важным параметром обработки является коэффициент перекрытия  $K = H/d$ . При  $K < 1$  пятна накладываются с перекрытием, т.е. вся поверхность обрабатывается полностью. При  $K > 1$  пятна накладываются без перекрытия, т.е. между ними имеются необработанные участки. В этом случае в качестве дополнительной характеристики лазерной обработки вводится доля необработанной части поверхности  $\gamma$ .

Если обработка по контуру ведется по двум взаимно перпендикулярным осям: оси  $Ox$  с шагом  $H_x$  и оси  $Oy$  с шагом  $H_y$ , то процесс может характеризоваться также коэффициентом заполнения поверхности  $K_z = S_{обр} / S_{конт}$  и коэффициентом использования импульсов  $K_u = S_{обр} / S_s$ , где  $S_{обр}$  – обработанная площадь в контуре,  $S_{конт}$  – площадь контура, подлежащая обработке,  $S_s$  – суммарная площадь единичных пятен.

Обычно применяется два вида схем обхода по контуру (рис.). В схеме *I* пятна во всех рядах расположены друг под другом, а шаги по координатам  $x$  и  $y$  одинаковы. В схеме *II* пятна в рядах смещены на половину шага, причем шаг по координате  $y$  меньше, чем шаг по координате  $x$ . В схеме *II* доля неупрочненной части поверхности  $\gamma$  меньше, чем в схеме *I*. Обе схемы могут иметь разновидности при  $K_{\pi} < 1$  и  $K_{\pi} > 1$ , что приводит к изменению  $K_z$  и  $K_u$ , а также характеристик обрабатываемой поверхности.

При непрерывной обработке производится последовательное наложение на поверхность полос шириной  $d$  с шагом  $H$  (рис.). Здесь также важным параметром обработки является коэффициент перекрытия  $K = H/d$ . Полосы могут быть наложены с перекрытием (при  $K < 1$ ) и без перекрытия (при  $K \geq 1$ ).

Во втором случае к характеристикам лазерной обработки добавляется доля необработанной части поверхности  $\gamma$ .

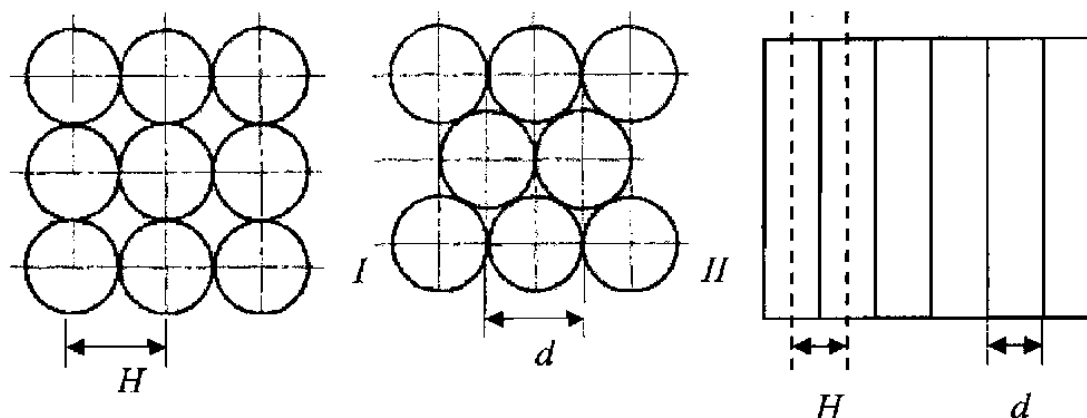


Рис. Схемы наложения лазерных пятен и полос при  $K = 1$ .

Увеличение  $\gamma$  ведет к повышению производительности процесса, однако при этом важно установить предельное значение  $\gamma$ , при превышении которого становится невозможным обеспечить требуемое качество обрабатываемой поверхности. Обычно эффекты структурного модифицирования поверхности проявляются в пределах некоторой зоны лазерного термического влияния, диаметр которой  $D$  зависит не только от энергетических параметров лазерной обработки, но также от условий теплоотвода и в общем случае не совпадает с диаметром лазерного пятна  $d$ . Это обстоятельство следует учитывать при выборе значений  $K$ .

Если плотность мощности излучения распределена в пределах лазерного пятна довольно равномерно, то, как правило,  $D > d$ . При постоянстве энергетических параметров разница диаметров зоны термического влияния и пятна  $\Delta = D - d$  является постоянной величиной и, как следствие,  $D$  с увеличением  $d$  увеличивается на одно и то же значение  $\Delta$ :  $D = d + \Delta$ . Однако с повышением энергетических параметров значение  $\Delta$  изменяется, в результате чего  $D$  увеличивается, даже если  $d$  остается неизменным.

На практике при оптимизации условий лазерной обработки важно учитывать не только характер модифицирования структуры, который обеспечивается теми или иными условиями обработки, но также качественные характеристики материала, которые при этом достигаются.

Рассмотрим в сравнении особенности эффектов структурного модифицирования поверхности материалов при использовании методов лазерного термического упрочнения и лазерного геттерирования.

Метод лазерного поверхностного термического упрочнения, иначе называемый лазерной закалкой, наиболее широко применяется для упрочнения железоуглеродистых сплавов (сталь, чугун). Упрочняющий эффект достигается путем нагрева материала до температуры, при которой происходит аустенизация, т.е. углерод присутствует в виде твердого раствора карбида железа в  $\gamma$ -Fe. Последующее быстрое охлаждение приводит к переходу к мартенситной структуре, при которой карбид сохраняется в растворе в  $\alpha$ -Fe. Эта фаза характеризуется более высокой твердостью [1]. Основная цель лазерной закалки – повышение износостойкости материалов, работающих в условиях трения.

Процесс закалки имеет свои особенности при обработке материалов импульсными и непрерывными лазерами [2]. И в том, и в другом случае важным параметром процесса является коэффициент перекрытия  $K$ , который в прин-

ципе может принимать различные значения. При  $K < 1$  вся поверхность упрочняется полностью, в то время как при  $K > 1$  на поверхности имеются неупрочненные участки. С увеличением  $K$  не только увеличивается доля неупрочненной части поверхности  $\gamma$ , но, что особенно критично, уменьшается равномерность глубины упрочнения  $h$ , т.е. увеличивается параметр  $h_{min}/h_{max}$ .

При импульсной закалке параметр  $h_{min}/h_{max}$  возрастает особенно значительно при  $K > 0,6$ . Поэтому с целью повышения эффективности процесса и качества упрочненного слоя импульсную закалку обычно ведут при  $K \approx 0,5$ .

При непрерывной закалке обычно значение  $K$  лишь немного меньше единицы из-за значительного теплового влияния при наложении полосы на предыдущую полосу. Довольно часто высокая износостойкость достигается при условии, когда упрочненные полосы располагаются на некотором расстоянии друг от друга так, что обработанная лазером площадь составляет 50% от общей площади и даже менее, т.е. когда  $K$  явно больше единицы.

Метод лазерного геттерирования наиболее широко применяется для исключения нежелательного влияния точечных дефектов – вакансий и атомов побочных примесей металлов на характеристики полупроводниковых кремниевых пластин [3–5]. Лазерное геттерирование позволяет накапливать эти дефекты в нерабочих участках или вообще удалять их из пластин. Суть метода заключается в том, что под действием лазерного излучения на нерабочей стороне пластины формируется нарушенный слой с высокой плотностью дислокаций и других нарушений кристаллической структуры, которые являются стоком для точечных дефектов. Последние, имеющие коэффициенты диффузии, на несколько порядков превышающие коэффициенты диффузии легирующих примесей (В, Р, Sb), при термообработке мигрируют по объему полупроводниковой пластины и, попадая в нарушенный слой, осаждаются на его структурных дефектах.

Лазерное геттерирование, по аналогии с лазерной закалкой, осуществляется как в импульсном, так и в непрерывном режиме излучения. В первом случае на нерабочей стороне пластины (толщиной  $\sim 0,5$  мм), подвергаемой оплавлению, формируется сеть мелких лунок (глубиной  $\sim 10$  мкм и диаметром  $\sim 50$  мкм), во втором – последовательность полос (глубиной  $\sim 10$ – $20$  мкм и шириной  $\sim 50$ – $100$  мкм). При импульсном геттерировании степень нарушения кристаллической структуры пластин регулируется путем изменения диаметра и плотности расположения лунок, при непрерывном – путем изменения толщины и плотности расположения полос.

Эффекты лазерного геттерирования существенно зависят от энергетических параметров обработки. В качестве примера в табл. представлены типичные эффекты геттерирования кремниевых пластин с помощью АИГ:Nd-лазера с длиной волны  $1,06$  мкм, луч которого, сфокусированный в пятно диаметром  $\sim 50$ – $100$  мкм, сканировал по поверхности нерабочей стороны пластины со скоростью  $\sim 0,2$  м/с [3]. Расстояние между полосами варьировали в пределах от  $0,5$  до  $5$  мм. Было установлено, что оптимальные условия геттерирования создаются при плотности энергии излучения  $E_0 \sim 10$ – $20$  Дж/см<sup>2</sup> с соответствующими глубиной нарушенного слоя  $5$ – $10$  мкм и расстоянием между полосами  $0,5$ – $1$  мм, т.е. когда  $K$  явно больше единицы. При этом плотность дислокаций (ямки травления) на планарной стороне кремниевых пластин, прошедших лазерную обработку с последующим отжигом, снижалась с  $10^6$  до  $\sim 0$  см<sup>2</sup>, а выход годных транзисторов увеличивался с  $33$  до  $57\%$  [3].

**Зависимость эффектов лазерного геттерирования  
от плотности энергии излучения  $E$**

$E_0, \text{ Дж/см}^2$	Эффект геттерирования
$E_0 < 7$	Наблюдается плавление локальных областей пластины кремния. Плотность дефектов мала, эффект геттерирования отсутствует
$7 \leq E_0 < 15$	Помимо плавления начинается испарение кремния в центральной зоне лазерного пятна, на периферии оплавленной области образуются дислокации, обусловленные неоднородным нагревом подложки
$15 \leq E_0 < 30$	Образуются стабильные дислокационные скопления
$E_0 \geq 30$	Глубина нарушенного слоя увеличивается до 20 мкм, что приводит к «прорастанию» дислокаций до планарной стороны пластины

Таким образом, полное покрытие поверхности материала последовательностью лазерных пятен (лазерных полос) является далеко не всегда обязательным условием реализации процесса лазерной обработки. Во многих случаях необходимый эффект структурного модифицирования поверхности, обеспечивающий высокие качественные характеристики материала, достигается при частичной обработке поверхности. Выбор оптимальных условий обработки предполагает поиск приемлемого сочетания порядка наложения на поверхность лазерных пятен (лазерных полос) и энергетических параметров облучения с учетом теплофизических свойств материала, которыми определяется характер теплоотвода. На практике необходимость полной или частичной лазерной обработки поверхности материала в значительной мере диктуется конечными целями обработки. В частности, как правило, полную обработку поверхности, причем в условиях оплавления, следует производить, когда ставится задача получения гладкого рельефа поверхности или ее герметизации, например, в случае обработки пористых порошковых материалов [6, 7]. С другой стороны, с целью маркирования поверхности производится селективная лазерная обработка, при которой целенаправленному лазерному воздействию подвергаются отдельные участки поверхности [8].

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Дьюли, У.* Лазерная технология и анализ материалов / У. Дьюли. – М.: Мир, 1986. – 504 с.
2. *Лазерная техника и технология:* в 7 кн. – Кн. 3: Методы поверхностной лазерной обработки: учеб. пособие для вузов / А.Г. Григорьянц, А.Н. Сафонов; под ред. А.Г. Григорьянца. – М.: Высш. шк., 1987. – 191 с.
3. *Лабунов, В.А.* Современные методы геттерирования в полупроводниковой электронике / В.А. Лабунов [и др.] // Зарубежная электронная техника. – 1983. – № 11 (270). – С 3–66.
4. *Lamedica, G., et al.* Gettering technology based on porous silicon // Solid State Phenomena. – 2002. – Vol. 82–84. – P. 405–410.
5. *Пилипенко, В.А.* Управление свойствами тонкопленочных систем с применением импульсной фотонной обработки / В.А. Пилипенко, В.Н. Пономарь, В.А. Горущко // ИФЖ. – 2003. – Т. 76, № 4. – С. 95–98.
6. *Толочко, Н.К.* Лазерное модифицирование покрытий  $\text{NiCrFe-50\%Cr}_3\text{C}_2$  / Н.К. Толочко [и др.] // Материалы, технологии, инструменты. – 2001. – Т. 6, № 2. – С. 60–63.

7. Толочко, Н.К. Трансформирование покрытий  $ZrO_2$  под действием лазерного излучения / Н.К. Толочко [и др.] // Материалы, технологии, инструменты. – 2001. – Т. 6, № 3. – С. 82–85.
8. Толочко, Н.К. Формирование волнообразного поверхностного рельефа при лазерной обработке материалов / Н.К. Толочко [и др.] // Перспективные материалы. – 2001. – № 1. – С. 49–57.

#### S U M M A R Y

*Some regularities of laser surface processing of materials are discussed. Different schemes of laser beam action on the material surface are analyzed taking into account laser radiation energetic parameters. The peculiarities of laser surface hardening and laser gettering processes are considered in comparison.*

*Поступила в редакцию 27.10.2006*