

Я.В. Фаттахов, М.Ф. Галяутдинов, Т.Н. Львова, И.Б. Хайбуллин

ДИНАМИКА ПЛАВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ МОЩНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ НЕКОГЕРЕНТНОГО СВЕТА

Впервые исследовалась динамика анизотропного локального плавления имплантированного кремния в различных режимах светового облучения. Образование и рост локальных областей плавления (ЛОП) во время импульсного светового облучения регистрировались скоростной кинокамерой. Впервые зависимость количества и размеров ЛОП от времени была исследована в динамике.

Получена дополнительная информация о дефектообразовании в имплантированных полупроводниках в процессе облучения импульсами света.

Исследование процессов плавления и кристаллизации материалов в нестационарных условиях при облучении мощными импульсами когерентного и некогерентного света вызывает большой интерес. С одной стороны, это обусловлено необходимостью изучения физики быстропротекающих структурных и фазовых переходов при облучении мощными импульсами света с длительностью от пикосекунд до единиц секунд. С другой стороны, эти исследования имеют несомненное практическое значение, поскольку позволяют оптимизировать режимы импульсного светового отжига ионно-легируемых слоев полупроводников, импульсной твердофазной диффузии из поверхностных источников и ориентированной рекристаллизации аморфных и поликристаллических пленок кремния на изолирующей подложке. Здесь особо важное значение приобретают вопросы определения размеров критического зародыша, гомогенного и гетерогенного зародышеобразования, условий и режимов облучения, при которых наблюдается эффект локального плавления и (или) обеспечиваются однородность фронта и требуемая глубина плавления.

Один из интересных физических эффектов, наблюдающихся при взаимодействии мощного оптического излучения с веществом, – это эффект анизотропного локального плавления полупроводников. Эффект заключается в том, что в результате воздействия мощными импульсами когерентного или некогерентного света с длительностями импульса от $\sim 0,2$ мс до 10 с на поверхности полупроводника образуются локальные области плавления (ЛОП), разделенные участками нерасплавившегося материала [1–7].

Эксперименты по наблюдению ЛОП и изучению закономерностей их формирования были выполнены с применением как когерентных, так и некогерентных источников света (непрерывных CO_2 -лазеров, лазеров ИАГ: Nd и на стекле с неодимом с длительностями импульса $\tau \sim 0,2$ –6 мс, ламп-вспышек с $\tau = 10$ мс, галогенных ламп накаливания с $\tau \sim 10$ с и др.) [1–3, 5, 7].

Для монокристаллического кремния, на котором проведены основные исследования, ЛОП имеют строго ограниченную правильную геометрическую форму, однозначно связанную с кристаллографической ориентацией поверхности полупроводника (рис. 1).

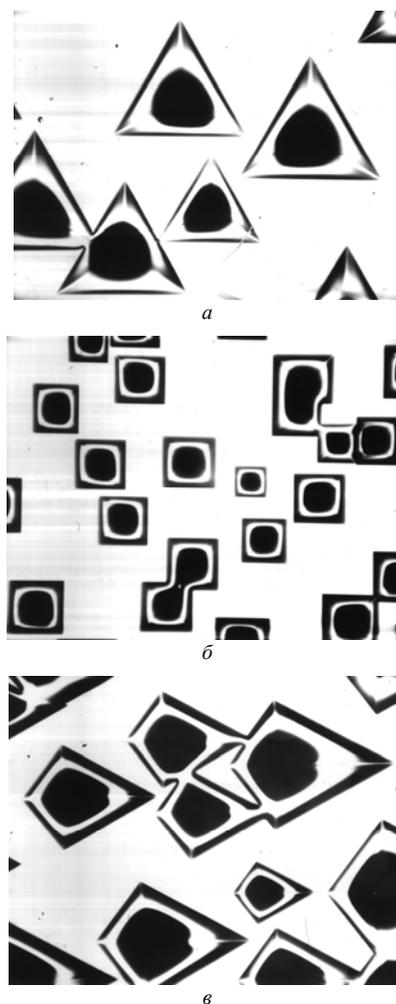


Рис. 1. Микрофотографии поверхности образцов монокристаллического кремния ориентации: *a* – (111); *b* – (100); *v* – (130), подвергнутых импульсному световому облучению в режиме локального плавления

Несмотря на довольно большое количество работ, до сих пор нет ясности и единства в объяснении природы, механизма возникновения эффекта анизотропного локального плавления, его основных закономерностей. Для выявления механизма и основных закономерностей анизотропного локального плавления, природы центров зародышеобразования жидкой фазы необходимо было провести дополнительные исследования, в том числе, и *in situ* экспериментов.

Нами были выявлены и изучены особенности формирования ЛОП [8]:

- на монокристаллическом кремнии – в зависимости от типа проводимости, концентрации примеси и носителей, кристаллографической ориентации поверхности;

- на имплантированном кремнии – в зависимости от энергии, дозы, температуры имплантации, типа внедряемого иона и от ориентации подложки.

На основе полученных результатов и анализа литературных данных предложена модель, которая, на наш взгляд, наиболее полно и корректно описывает всю совокупность экспериментальных результатов. Механизм включает в себя следующие основные моменты:

- существование барьера зародышеобразования жидкой фазы;

- образование кратковременного метастабильного состояния, характеризующегося перегревом в твердой фазе относительно равновесной температуры плавления;

- рост величины перегрева с укорочением длительности светового импульса (при соответствующем увеличении плотности мощности излучения);

- доминирующая роль гетерогенного механизма зародышеобразования жидкой фазы на дефектах структуры.

В настоящей статье приведены первые результаты, полученные авторами при исследовании эффекта анизотропного локального плавления в динамике.

Для исследования динамики эпитаксиальной твердофазной рекристаллизации аморфизованного ионно-легированного слоя до достижения температуры локального плавления, длительности существования локального расплава и особенностей жидкофазной рекристаллизации ЛОП (после выключения светового импульса) была изготовлена специальная дифракционная решетка с применением имплантации [9]. Один из вариантов этой решетки приведен на рис. 2.

С этой целью пластины монокристаллического кремния ориентации (100) были предварительно имплантированы ионами фосфора через тонкую металлическую сетку на ионно-лучевом ускорителе ИЛУ-3. Энергия и доза имплантации были выбраны таким образом, чтобы аморфизованный слой начинался непосредственно от поверхности образца. В результате этого на поверхности формируются аморфные ячейки, ограниченные сеткой монокристаллического

кремния. При освещении такой решетки непрерывным излучением He–Ne-лазера наблюдается дифракционная картина, интенсивность которой зависит от разности оптических характеристик имплантированных и неимплантированных областей. Во время действия светового импульса по мере нагрева имплантированного образца происходит твердофазная эпитаксиальная рекристаллизация аморфного слоя, затем локальное плавление. Структурные и фазовые превращения приводят к изменению коэффициента отражения кремния и заметному изменению дифракционной эффективности.

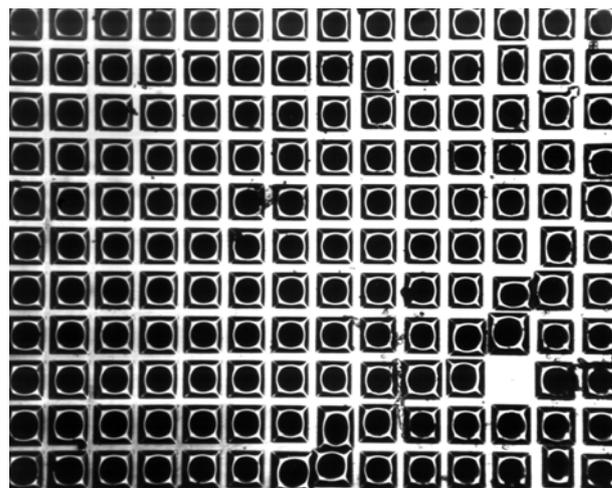


Рис. 2. Специальная дифракционная решетка, изготовленная для исследования динамики эффекта анизотропного локального плавления (вид после ионной имплантации и импульсного светового облучения в режиме локального плавления)

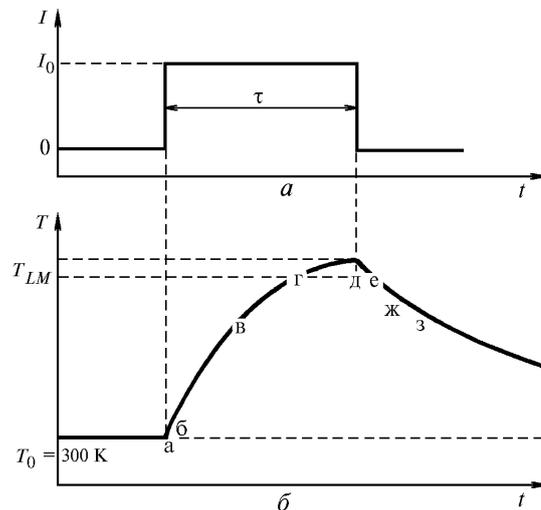


Рис. 3. Схематическая форма импульса некогерентного света (τ – длительность светового импульса, I_0 – плотность мощности излучения) – a ; b – зависимость температуры образца кремния в течение и по окончании импульса некогерентного света (расчет без учета образования ЛОП). T_0 – начальная температура образца; T_{LM} – температура локального плавления поверхности. Буквами a , b , v , g , d , e , $ж$, $з$, обозначены моменты времени, для которых приведены дифракционные картины на рис. 4

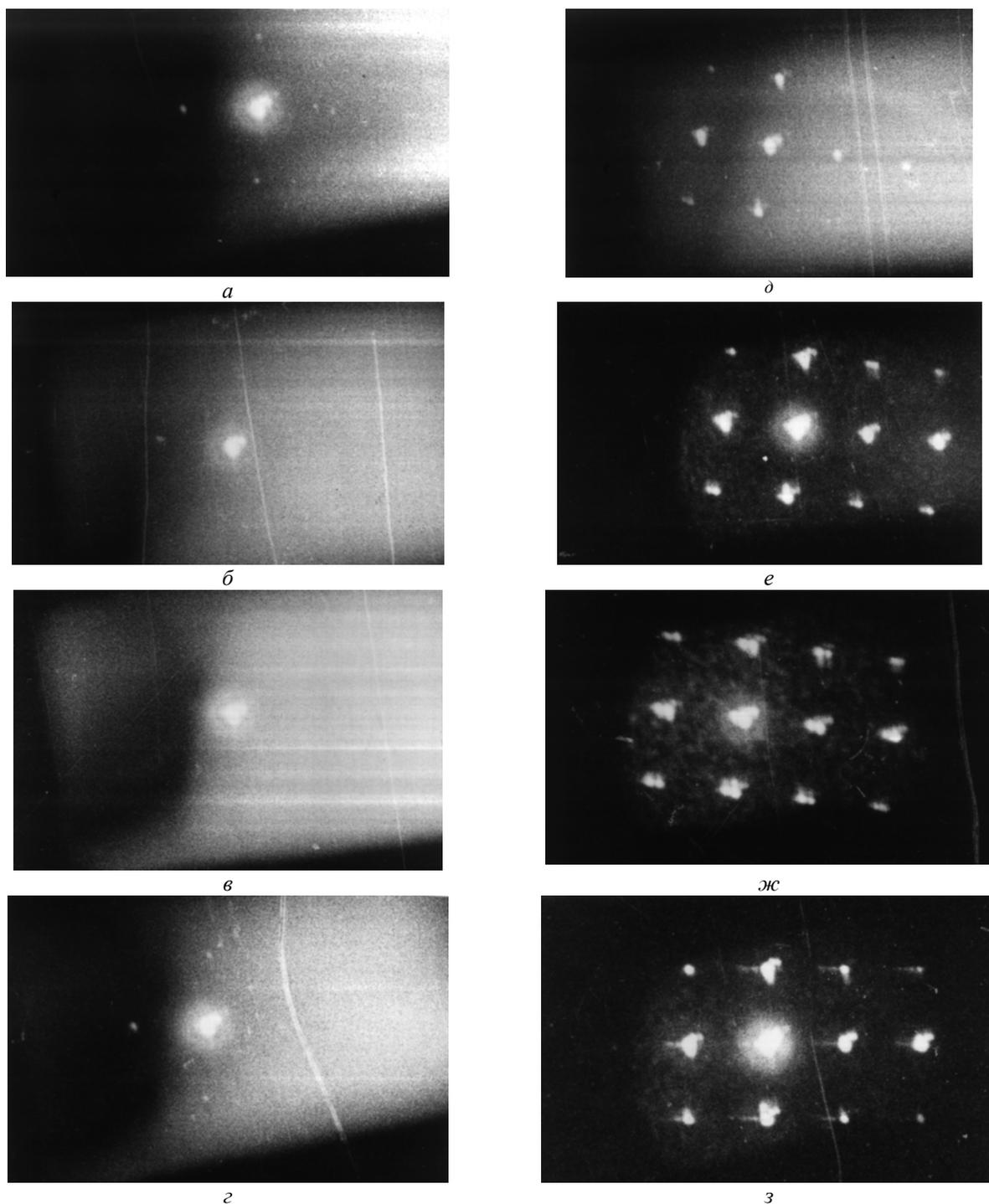


Рис. 4. Изменение дифракционной картины в течение светового импульса $\tau = 129$ мс

Такие изменения дифракционной эффективности имплантированной решетки были использованы для изучения динамики процессов рекристаллизации и анизотропного локального плавления при импульсном световом облучении.

На рис. 3, а приведена качественная форма импульса некогерентного света, используемого для обработки образцов кремния в режиме локального

плавления. Облучение проводилось на установке УОЛ.П-1 тремя ксеноновыми лампами, работающими в стробоскопическом режиме. Плотность мощности излучения I_0 определялась длительностью времени, в течение которого лампа была подключена к сети в каждый полупериод сетевого напряжения. Скорость нарастания температуры образца на переднем фронте теплового импульса

(рис. 3, б) зависит от величины I_0 , а максимальная температура как от I_0 , так и от длительности светового импульса τ .

На рис. 4 представлены фотографии изменения дифракционной картины в течение светового импульса, полученные с применением скоростной кинокамеры СКС-1М-16 со скоростью 1800 кадров/с при освещении решетки непрерывным излучением He-Ne-лазера. На рис. 4, а приведена дифракционная картина с исходной амплитудой решетки. Хорошо видно, что дифракционная эффективность (ДЭ) этой решетки относительно низкая за счет малого контраста в коэффициентах отражения монокристаллического и аморфизованного кремния на длине волны излучения лазера $\lambda = 0,63$ мкм.

По мере нагрева образца со сформированной дифракционной решеткой и эпитаксиальной твердофазной рекристаллизации имплантированного слоя происходит уменьшение ДЭ и ее полное исчезновение с момента времени $t = 70$ мс (рис. 4, б, в). Это означает, что завершилась рекристаллизация аморфного слоя или же, по крайней мере, его толщина стала меньше толщины скин-слоя излучения зондирующего лазера. Дифракционная картина возникает вновь, когда температура образца с решеткой достигает температуры локального плавления. При этом начинается локальное плавление «аморфизованных» ячеек дифракционной решетки ($t = 119$ мс, рис. 4, г).

По мере увеличения площади расплава (вплоть до полного заполнения «аморфной» ячейки) происходит увеличение ДЭ (рис. 4, д, е). Существенный вклад в увеличение ДЭ вносит и появление микрорельефа на поверхности расплавленных областей, т.е. происходит преобразование отражательной дифракционной решетки в фазовую [9]. После выключения светового импульса, остывания образца и рекристаллизации локальных областей расплава дифракционная эффективность остается постоянной (рис. 4, ж, з).

Таким образом, на основе анализа изменения дифракционной картины в течение светового импульса можно четко определить параметры, необходимые для создания физической картины эффекта:

– длительность процесса твердофазной рекристаллизации аморфного слоя в течение переднего фронта теплового импульса;

– момент достижения температуры плавления для монокристаллического и аморфизованного кремния;

– длительность пребывания участков поверхности в расплавленном состоянии в течение светового импульса и после его выключения.

Нами были проведены также первые микросъемки зарождения и роста локальных областей плавления в процессе импульсного светового облучения.

Было показано, что зарождение ЛОП происходит преимущественно в течение узкого временного интервала в начале светового импульса. Затем эти ЛОП растут в размерах, иногда сливаясь в одну расплавленную область.

Зарождение ЛОП в узком интервале времени хорошо согласуется с моделью, предложенной нами ранее [8]: зарождение ЛОП происходит в начальной стадии светового импульса в условиях существования перегрева в твердой фазе относительно равновесной температуры плавления полупроводника. Плотность ЛОП (количество на единицу площади) зависит от величины перегрева. Чем больше величина перегрева, тем большее число дефектов становится центрами зарождения локальной жидкой фазы.

Работа выполнена в рамках проектов, поддержанных Министерством науки РФ (проект N 140/57/2) и РФФИ (проекты 94-02-03620 и 96-15-97265).

1. Heinig K.-H. // Energy Pulse Modification of Semiconductors and Related Materials. Dresden: ZfK, 1985. P. 265–279.
2. Celler G.K., Robinson Mc D., Trimble L.E., Lishner D.J. // Appl. Phys. Lett. 1983. V. 43. N 9. P. 868–870.
3. Вейко В.П., Имас Я.А., Либенсон М.Н., Шандыбина Г.Д., Яковлев Е.Б. // Изв. АН СССР. Сер. Физич. 1985. Т. 49. N 6. С. 1236–1239.
4. Гайдук П.И., Комаров Ф.Ф., Соловьев В.С. // XV Всесоюз. совещ. по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. (Тезисы докл.). М.: Изд-во МГУ, 1985. С. 106.
5. Кияк С.Г., Бончик А.Ю., Гафийчук В.В., Южанин А.Г., Тылюк И.В., Похмурская А.В. // Изв. АН СССР. Сер. Физич. 1988. Т. 52. N 11. С. 2276–2281.
6. Emel'yanov V.I. // Laser Phys. 1992. N 2. P. 389–466.
7. Демчук А.В., Данилович Н.И., Лабунцов В.А., Пристрем А.М. // Поверхность. Физ. хим. мех. 1988. N 1. С. 106–114.
8. Фаттахов Я.В., Баязитов Р.М., Хайбуллин И.Б., Львова Т.Н., Еремич Е.А. // Изв. АН. Сер. физич. 1995. Т. 59. N 12. С. 136–142.
9. Фаттахов Я.В., Галютдинов М.Ф., Львова Т.Н., Хайбуллин И.Б. // Журнал технической физики. 1997. Т. 67. N 12. С. 97–99.

Казанский физико-технический институт
Казанского научного центра Российской Академии наук

Поступила в редакцию
20 октября 1997 г.

Ya. V. Fattakhov, M. F. Galyautdinov, T. N. L'vova, I. B. Khaibullin. **Dynamics of Silicon Melting under Exposure to High Power of Incoherent Light.**

The dynamics of anisotropic local melting of implanted silicon at different regimes of light pulses is investigated in this work. The nucleation and growth of LRMs (local regions of melting) during the light irradiation was detected using high-speed camera. First the time dependencies of the quantity and sizes of LRMs were detected in dynamics. The diffraction gratings were formed using the effect of local melting. The dynamics of diffraction during and after the light pulse action was investigated.

Additional information about defect formation in the implanted semiconductors during the light pulse irradiation is obtained.