ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ЛАЗЕРНЫХ И ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ РАН

Лазерно-стимулированные процессы генерации и взаимодействия нано-микроструктур дефектов в конденсированных средах

А.Ф.Банишев

(Основные соавторы работы: А.В.Шишков, А.Ю.Кремнев, В.Я.Панченко, В.С.Голубев, В.И.Емельянов, К.С.Мерзляков)

Большое внимание в последнее время уделяется изучению наноструктур, что связано с ростом интереса к перспективам развития нанотехнологий и наноэлектроники. Дефекты кристаллической структуры такие как поры и дислокации имеющие нанометровые размеры можно также отнести к наноструктурам. Известно, что именно дефекты во многом определяют основные физические свойства материалов. Поэтому исследование таких структур и разработка надежных методов их создания и управления ими (размерами, концентрацией, взаимодействием их между собой, пространственным распределением) необходимо для разработки технологий получения материалов с заданными физическими свойствами. В частности исследования в этом направлении представляют значительный интерес для технологии нанесения тонких пленок, создания светоизлучающих элементов и устройств, например, полупроводниковых электролюминесцентных светоизлучающих диодов и механолюминесцентных светоизлучающих сенсорных элементов на основе неорганических и органических материалов.

В данном обзоре приводятся основные результаты работ исследования процессов лазерной генерации, взаимодействия и самоорганизации структурных дефектов в конденсированных средах.

Основные результаты:

1. Обнаружено и исследовано новое явление:- образование упорядоченных структур пор в металлических пленках при лазерном пиролитическом осаждении из газовой фазы на неоднородно нагретую поверхность.
2. Экспериментально установлена последовательность микроструктурных изменений в приповерхностном слое монокристаллического кремния связанная с генерацией и самоорганизацией структурных дефектов при воздействии миллисекундных лазерных импульсов.
3. Экспериментально исследовано и предложена физическая модель корректно описывающая твердофазное разрушение поверхности монокристаллического кремния при импульсно-периодическом воздействии субмикросекундных лазерных импульсов в вакууме и в атмосфере окружающего газа.
4. Исследована механолюминесценция металлов. Установлено, что причиной механолюминесценции являются реакции взаимодействия зернограничных дислокаций с примесями локализованными в межзеренной области.
5. Исследована механолюминесценция новых материалов:- мелкодисперсных твердых растворов на основе алюминатов стронция-кальция с примесью редкоземельных элементов в фотополимерной матрице. Показано, что эти материалы обладают высокой чувствительностью к механическим воздействиям и могут быть использованы для создания механолюминесцентных сенсорных элементов.

I) Образование дефектов и упорядоченных структур дефектов в пленках при лазерном пиролитическом осаждении на неоднородно нагретую поверхность.

Значительный интерес в настоящее время проявляется к пленкам, устойчивым к воздействию повышенных тепловых, световых и электрических нагрузок, что связано с широким спектром применения их в элементной базе современной электроники, оптоэлектроники и лазерной оптики. В связи с этим возникает необходимость в проведении исследований физических механизмов образования и накопления дефектов в пленках как в процессе их получения, так и в результате внешних воздействий.

Определенная концентрация дефектов в пленках образуется еще в процессе их получения. Как правило, крупные дефекты (дислокации, поры, границы зерен, трещины, скопления примесей и т.д.) образуются вследствие несовершенства технологического процесса. Образованию дефектов в пленках в значительной степени способствуют несоответствие параметров кристаллических решеток подложки и напыляемой пленки и наличие дефектов на поверхности подложки. Компенсация несоответствия решеток может происходить с помощью структурных дефектов (вакансий, дислокаций и т.д.), что приводит к образованию дефектов в эпитаксиальной пленке.

Действие температуры и достаточно мощного излучения на пленки, как правило, приводит к генерации значительной концентрации новых дефектов. При большой концентрации дефектов (10^{19}-10^{21}) см$^{-3}$ становится существенным взаимодействие между ними. В результате внешних воздействий и взаимодействия между дефектами могут иметь место различные коллективные явления, приводящие к их пространственному перераспределению с образованием более крупных дефектов (например, пор в результате скопления вакансий) и пространственно-периодических структур дефектов. Наличие крупных дефектов создает большие внутренние напряжения и, таким образом, может способствовать образованию микротрещин и разрушению пленки.

В данном обзоре представлены результаты исследования механизмов генерации и самоорганизации дефектов в тонких металлических пленках в процессе их роста из газовой фазы на неоднородно нагретой с помощью лазерного излучения поверхности. Пленки осаждались в результате пиролитического разложения паров карбонилов переходных металлов $Mo(CO)_6$, $W(CO)_6$, $Cr(CO)_6$, на неоднородно нагретой подложке.

Обнаружено, что при определенных режимах осаждения в пленках могут образовываться структуры дефектов представляющие собой концентрические поры, которые в конечном итоге приводят к разрушению (отслоению) пленки. Определены режимы осаждения и измерены критические параметры осаждаемой пленки (скорость осаждения, толщина пленки, распределение толщины пленки вдоль подложки, распределение температуры вдоль подложки), при которых наблюдается образование периодических структур пор. Установлено, что при определенных условиях осаждения начинается периодическое отслоение пленки по местам скопления пор. Измерены основные параметры образующихся структур пор – период структур и зависимость периода от температуры и градиента температуры. Измерения толщины пленок проводилось на интерферометре “Zygo”, а измерения параметров структур – на профилометре “Talystep”. Установлено, что образование структур пор зависит от скорости осаждения пленки и что существуют режимы осаждения, при которых можно избежать образования структур пор и, таким образом, получать качественные пленки с высокой адгезией с подложкой. Обсуждаются основные силы и механизмы приводящие к пространственному распределению дефектов в пленке. Дана интерпретация наблюдаемого явления. Согласно модели, предложенной в работе образование периодических кольцевых структур пор происходит в результате развития пористо-деформационно-тепловой неустойчивости (ПДН), физический механизм которой состоит в следующем:

При превышении определенной скорости осаждения (роста пленки) концентрация пор достигает некоторой критической концентрации и однородное распределение

становится неустойчивым. Возбуждение затравочной изгибной деформации в пленке приводит к образованию периодически повторяющихся областей растяжения и сжатия. Вследствие деформационно-индуцированного дрейфа в областях сжатия пленки скапливаются вакансии, а в областях растяжения – поры. Это усиливает затравочные деформации, и, таким образом, организуется положительная обратная связь, приводящая к неустойчивости связанных между собой деформационной и концентрационной гармоник. В результате в областях растяжения достигается высокая неравновесная плотность пор и, как следствие, возможно образование макропор. С учетом симметрии распределения температуры на поверхности подложки (условий осаждения пленки) это приводит к образованию концентрических скоплений из пор. В местах скопления пор уменьшается адгезия пленки с подложкой, в результате происходит периодическое отслоение (разрушение) пленки от подложки.

Механизм образования периодических структур пор хорошо согласуется с моделью пористо деформационной неустойчивости, согласно которой период структур определяется как:

$$d \approx \frac{2\pi}{q_m} = \frac{2\pi l_0}{\left(\sqrt{\frac{g}{D}} - 1\right)^{\frac{1}{2}}} \qquad (1)$$

где $$l_0^{\,2} = \frac{c^2 h^2 \rho}{12\sigma_{11}} \qquad g = \frac{\sigma_\perp}{\sigma_{||}} \frac{S_0 N_0 D\,|\theta|}{4kT} \qquad (2)$$

c– константа порядка скорости звука, h-толщина пленки, ρ – плотность пленки, θ - деформационный потенциал, E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона, где S_0 – площадь основания цилиндрических вакансионных пор, N_0-плотность пор, $D=D_v n_{v0} a^3$ – коэффициент диффузии пор, D_v, n_{v0} - коэффициент диффузии и плотность вакансий, характерные значения $\sigma_\perp \approx 10^{10}$ дин/см^2, $\sigma_{||} \approx 10^8$-10^9 дин/см^2.

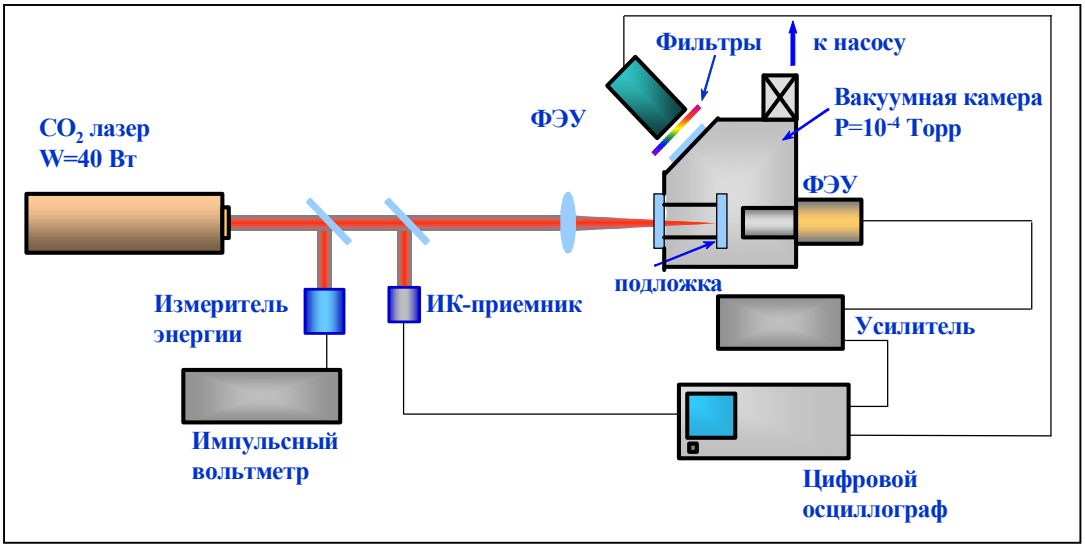
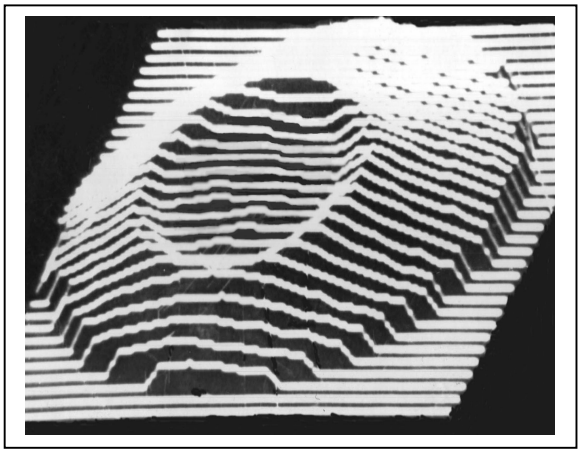


Рис.1. Схема экспериментальной установки для газофазного пиролитического осаждения пленок. Нагрев подложки осуществлялось с помощью излучения CO_2 лазера сфокусированного на внешнюю сторону подложки. На тыльной стороне подложки находящейся в вакуумной камере формировалось неоднородное распределение температуры. При напуске паров карбрнила происходило пиролитическое разложение молекул карбонила на неоднородно нагретой подложке и рост пленки



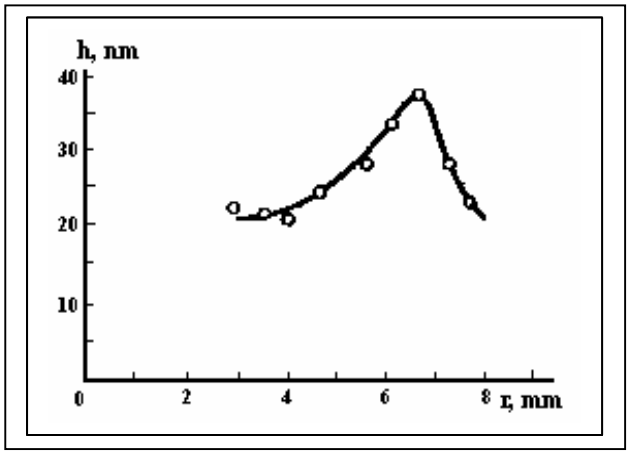
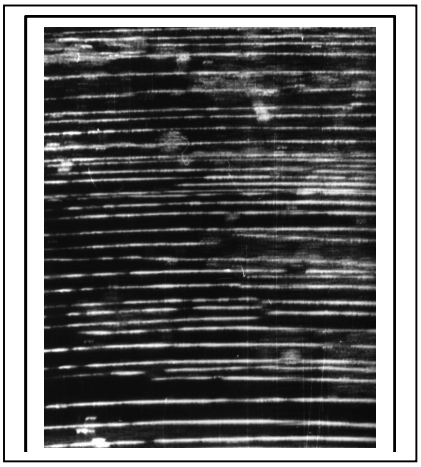


Рис.2а. Рельеф поверхности пленки измеренный на интерферометре “Zygo“.
Рис.2б. Зависимость толщины h(r) металлической пленки на промежуточном этапе осаждения, прописанной на профилометре “Talystep“.



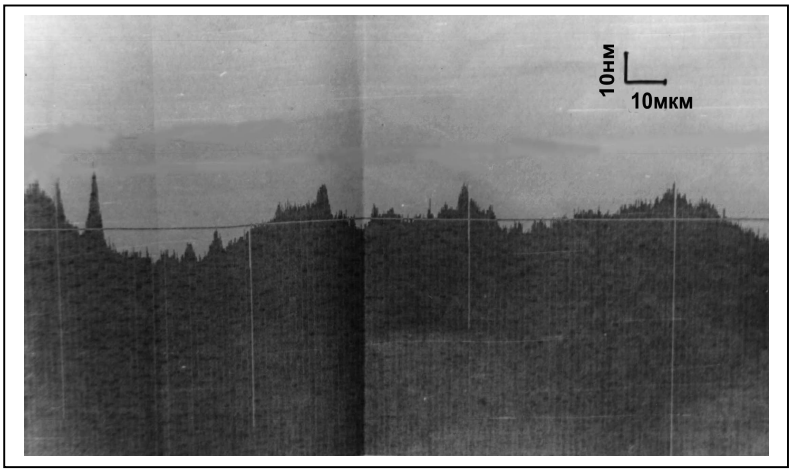


Рис.3. Периодическая структура концентрических пор. Расстояние между кольцами зависит от r и в области максимума распределения плотности кольцевых пор N(r) составляет $d \approx 3 \cdot 10^{-3}$см.
Рис.4. Рельеф поверхности, прописанный вдоль координаты r на профилометре “Talystep”. Выбранный участок поверхности соответствует значениям r в окрестности максимума N(r)

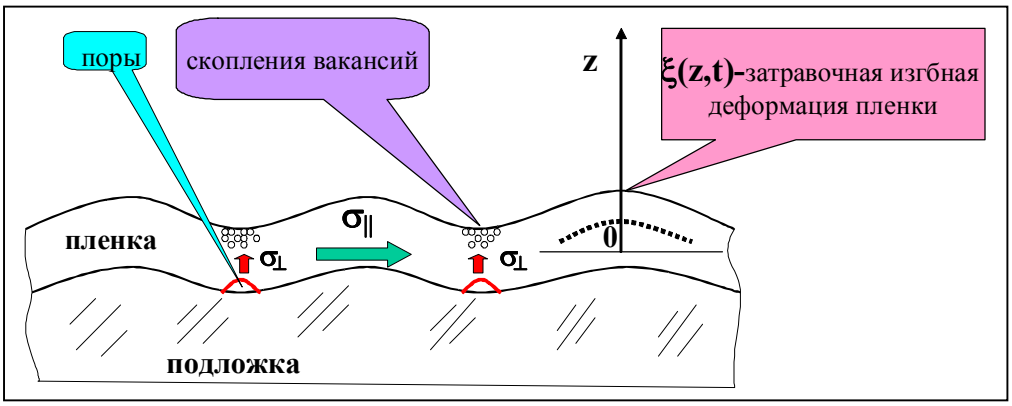


Рис.5. Механизм образования концентрических структур пор.
Пленка в деформированном состоянии на стеклянной подложке. В результате развития неустойчивости возникают периодические скопления пор на границе пленка-подложка, которые приводят к уменьшению сжимающих напряжений (адгезии) $\sigma_{\perp}$. Вакансии скапливаются в верхней половине пленки в области сжатия. $\sigma_{||}$ -продольные напряжения в пленке возникающие в результате лазерного нагрева границы пленка-подложка.

II) Генерация, взаимодействие и самоорганизация дефектов и структур дефектов в кремнии

Исследованию механизмов образования дефектов и структур дефектов в полупроводниках при воздействии различных видов концентрированных потоков энергии (потока частиц, излучения) посвящено значительное число работ. Интерес к этому понятен, так как полупроводники являются основными материалами современной твердотельной электроники, а наличие дефектов во многом определяет рабочие характеристики полупроводникового материала. Следует отметить, что наличие дефектов не всегда является нежелательным, наоборот, в ряде случаев присутствие тех или иных дефектов в материале является необходимым. Поэтому вопросы связанные с изучением механизмов образования дефектов и определения возможностей управления их концентрацией являются актуальными для полупроводниковой технологии.

В кристаллах, даже в самых совершенных всегда имеется определенная концентрация собственных дефектов (как правило вакансий, междоузлий):- это равновесные дефекты, наличие которых следует из законов термодинамики. Внешние воздействия могут за короткое время существенно, на несколько порядков увеличить концентрацию дефектов и таким образом создать условия когда их концентрация (неравновесная концентрация) становится значительно выше термодинамически равновесной концентрации. Именно в этих условиях как правило возникают явления самоорганизации в ансамбле дефектов, приводящие к пространственной модуляции плотности дефектов и образованию упорядоченных структур дефектов.

Особое внимание в последнее время уделяется изучению дефектов и наноструктур дефектов в кремнии, что вероятно связано с общим ростом интереса к изучению нанообьектов, обусловленного перспективами развития наноэлектроники, а также обнадеживающими результатами создания на основе кремния электролюминесцентных светоизлучающих приборов. Кремний на сегодняшний день является одним из основных материалов современной электроники, технология производства которого хорошо разработана и относительно недорогая. Поэтому, возможность создания кремниевых светодиодов по единой, хорошо разработанной “кремниевой” технологии с одной стороны и возможность естественной совместимости кремниевых светодиодов с различными электронными и оптоэлектронными интегральными устройствами выполненными на основе кремния и окиси кремния с другой стороны, во многом определили огромный интерес именно к кремниевым светоизлучателям.

Однако при создании кремниевого светодиода возникают определенные сложности. Дело в том, что чистый монокристаллический кремний является непрямозонным полупроводником и поэтому межзонные излучательные переходы в нем маловероятны из-за требований правил отбора по волновому вектору. Известно, что наличие структурных нарушений, таких как границы раздела фаз, структурные дефекты (дислокации, поры, кластеры) частично снимает запрет, что дает возможность поиска и создания эффективных излучателей на основе модифицированного (дефектосодержащего) таким образом кремния. Так в начале и середине 90$^{\underline{ых}}$ годов интенсивно исследовался пористый кремний на предмет фото- и электролюминесценции. Определенный интерес вызвали также исследования спектральных характеристик кремниевых гетероструктур, квантово-размерных кремниевых нитей (точек) и текстурированных пленок кремния. В последние несколько лет стали появляться обнадеживающие результаты исследования люминесцентных свойств дефектного (дислокационного) кремния и наночастиц кремния в различных матрицах (в том числе с примесями редкоземельных элементов). Однако несмотря на большой обьем интересных физических результатов полученных при исследовании различных модификаций кремния в различных условиях, проблема создания электролюминесцентных кремниевых светоизлучателей остается актуальной.

В данном обзоре приводятся основные результаты работ исследования процессов дефектообразования в кремнии при воздействии лазерного излучения проводимых в ИПЛИТ РАН за последние 10-15 лет. И хотя целью работ не ставилось создание кремниевых светоизлучателей, тем не менее полученные результаты имеют к этой проблеме непосредственное отношение, так как создавая те или иные дефекты и управляя их плотностью можно, как отмечалось выше, повышать вероятности процессов излучательной рекомбинации в кремнии.

Возможность лазерной генерации в кристаллах (диэлектриках, полупроводниках, металлах) высокой концентрации структурных дефектов (вакансий, междоузлий, дислокаций, пор) –давно известное явление. Однако до настоящего времени не до конца понятыми остаются механизмы аномально высокой лазерно-стимулированной диффузии дефектов, механизмы образования и роста макродефектов (дислокаций, кластеров) в инициируемых лазерным излучением неоднородных полях температуры и концентрации точечных дефектов, а также механизмы формирования упорядоченных структур макродефектов (упорядоченных структур дислокаций, кластеров).

Недостаточно исследовано влияние лазерно-индуцированных неравновесных структурных дефектов на скорость диффузии примесей. Высокая концентрация лазерно-индуцированных вакансий и междоузлий ($\sim 10^{20}$-10^{21} см$^{-3}$), которая достигается в момент действия лазерного импульса, может существенно изменить скорость диффузии примесных атомов протекающей по вакансионному или междоузельному механизму. Известно также, что дислокации (границы зерен и фаз) являются путями ускоренной диффузии для собственных дефектов и примесных атомов, в результате коэффициенты диффузии по дислокациям D_d могут на несколько порядков превышать коэффициенты объемной диффузии.

Таким образом уже из краткого обзора следует, что изучение процессов генерации, взаимодействия и самоорганизации дефектов в полупроводниках имеет как самостоятельное фундаментальное значение для физики твердого тела, так и прикладное для направленной модификации свойств полупроводников.

В представленном обзоре приведены результаты исследований процессов генерации и накопления дефектов в приповерхностном слое монокристаллического кремния при различных условиях и режимах лазерного воздействия. Исследовалось влияние окружающей атмосферы и типа газа на процесс генерации дефектов и влияние дефектов на диффузию атомов внешнего газа (примесных атомов) в приповерхностный слой кремния. С этой целью эксперименты проводились как в вакууме ($P \approx 10^{-2}$ Торр.) и в атмосфере ($P_{газ} \approx 1$ атм.) различных газов:-активных (кислород, азот, углекислый газ) и инертных (гелий, аргон, криптон). Обсуждаются возможные механизмы образования и роста дефектов.

Установлено, что при воздействии длинных лазерных импульсов ($\tau \sim 10^{-3}$ с) генерация, рост и самоорганизация дефектов может происходить в течении одного импульса, в то время как при воздействии короткого лазерного импульса ($\tau \sim 10^{-7}$ с) образующиеся дефекты (дислокации) имеют малые размеры (несколько нанометров) и практически не приводят к разрушению поверхности. Рост дислокаций и разрушение поверхности в этом случае носит накопительный характер и проявляется при импульсно-периодическом воздействии. При воздействии лазерного импульса происходит рост дислокации, а между импульсами релаксация. Конкуренция этих двух процессов определяет пороговое число импульсов приводящих к разрушению поверхности. Пороговое число импульсов зависит от плотности мощности лазерного излучения и периода следования импульсов.

Качественно размер дислокации к концу k-го импульса можно оценить с помощью следующего выражения:

$$R_k^{+} \approx \Delta R \sum_{p=0}^{k-1} \left[\exp(-\frac{\tau_r}{\tau_0}) + \exp(-\frac{\tau}{\tau_0}) - \exp(-\frac{\tau_r + \tau}{\tau_0}) \right]^p \qquad (1)$$

где R_k^{+}- размер дислокации к концу k-го импульса,
ΔR- размер дислокации к концу первого лазерного импульса,
τ_0-постоянная времени релаксации дислокации,
τ_r-время релаксации дислокации, τ-период следования импульсов

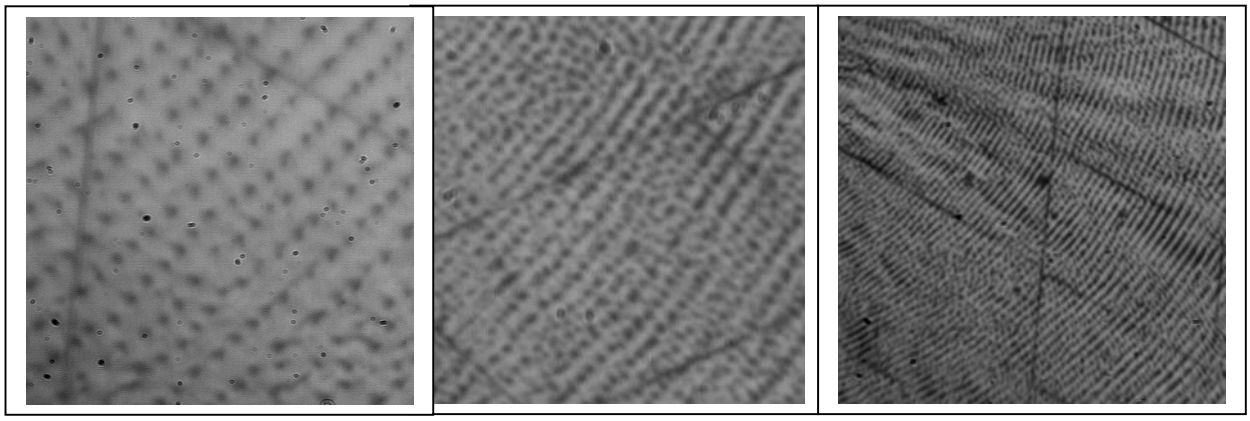


Рис. 6. Периодическая структура дислокаций в приповерхностном слое кремния образованная при воздействии длинного (миллисекундного) лазерного импульса.
В результате воздействия лазерного импульса происходит генерация дефектов и развитие дефектно-деформационной неустойчивости, которая приводит к формированию периодической структуры дислокаций.
Темные точки – локальные участки плавления поверхности в местах выхода дислокаций на поверхность. (период структуры d ≈ 5÷6мкм)

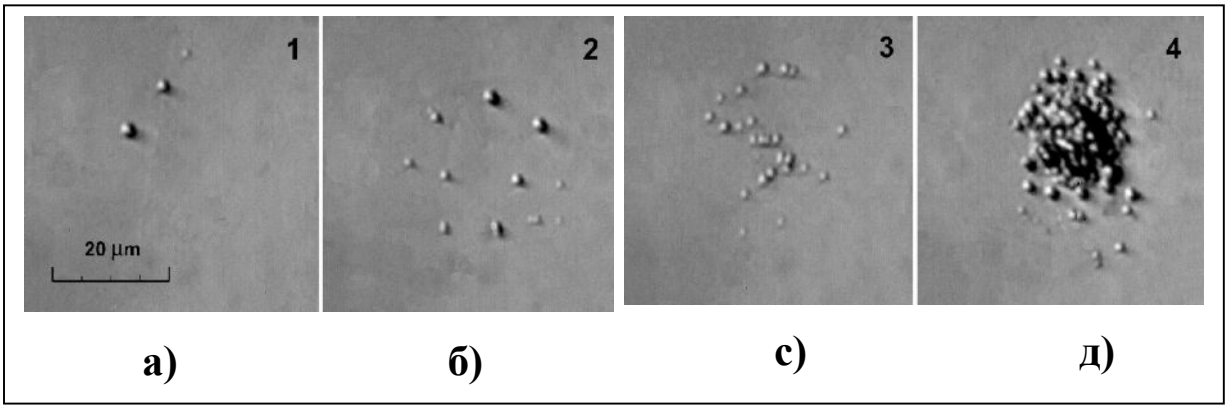


Рис.7. Дислокации в приповерхностном слое кремния при многоимпульсном воздействии коротких (субмикросекундных) лазерных импульсов (разрушение поверхности).
Фотографии поверхности образцов после облучения лазерными импульсами и обработки в травителе ($I=2.8\times10^6$ W/cm^2, период следования импульсов 50Гц),
время облучения: а) - 10 с, б) - 20 с, с) - 50 с, д) - 100 с).
Темные точки: - локальное плавление поверхности в местах выхода дислокаций.

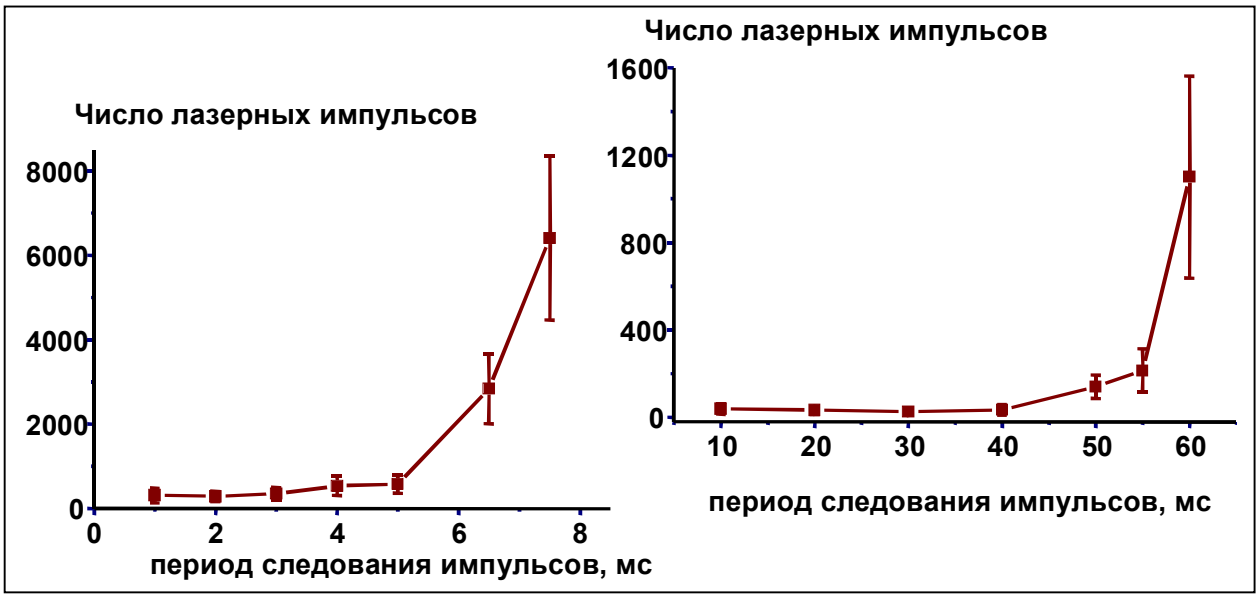


Рис.8. Зависимость критического числа лазерных импульсов (ЛИ), воздействие которых приводит к разрушению поверхности образца, от периода следования импульсов:

а) плотность мощности лазерного импульса $I=2.5\times10^6$Вт/см^2
б) плотность мощности лазерного импульса $I=3.2\times10^6$Вт/см^2

III) Исследование механолюминесценции тонких металлических пленок, мелкодисперсных порошков и полимеров

Активация процессов рождения и взаимодействия дефектов при интенсивных внешних воздействиях, особенно в условиях, близких к порогу разрушения материала, и при разрушении, может сопровождаться эмиссией частиц и света (электронов, ионов, атомов, кластеров и фотонов). Энергетическое и временное распределение эмитированных частиц непосредственно связаны с реакциями взаимодействия структурных дефектов в процессе разрушения, что позволяет использовать эмиссионные явления для исследования механизмов деградации и разрушения различных материалов.
Все больший интерес в последнее время проявляется к исследованию деформационно-стимулированной эмиссии фотонов (механолюминесценции-МЛ). Механолюминесценция – это свечение (люминесценция) материала в результате пластической деформации возникающей при воздействии механических напряжений (например при изгибе, сжатии, ударе, вибрации и т.д.). К настоящему времени опубликован целый ряд работ, в которых исследовалась МЛ возникающая при взаимодействии различных дефектов, например, дислокаций в диэлектриках, примесных центров и дислокаций в полупроводниках, дислокаций между собой и с поверхностью в металлах в результате пластической деформации. Установлено, что интенсивность МЛ зависит от величины и скорости внешних воздействий, а также от концентрации и подвижности дефектов, и в разных материалах (при одинаковых механических нагрузках) может отличаться на порядки.

Возможность возбуждения МЛ материала в видимой области спектра указывает на то, что в процессе деформации происходит возбуждение электронных состояний и их последующий излучательный распад.

В последнее время появились работы в которых явление механолюминесценции успешно используется в диагностических целях для визуализации распределения механических напряжений в материалах, а также для создания механолюминесцентных сенсорных элементов для регистрации механических воздействий, вибраций, ударов и т.д.

В таких элементах происходит прямое преобразование механических воздействий в оптический сигнал и поэтому они могут непосредственно интегрироваться в оптоволоконные информационно-измерительные системы и сети. Совместно с изделиями интегральной и волоконной оптики могут применяться в датчиках ударных воздействий, в системах регистрации и мониторинга полей импульсных механических деформаций и вибраций возникающих в различных узлах и конструкциях, а также в геофизике (в сейсмологии) и в авиакосмической технике. Мехатронные сети на основе механолюминесцентных сенсорных элементов и оптоволоконных линий передачи информации нечувствительны к внешним электромагнитным помехам, не требуют гальванической развязки, и позволяют передавать значительно большие плотности информации.

В связи с этим возникает потребность в поиске и исследовании новых материалов с низким порогом возбуждения механолюминесценции и с высокой эффективностью преобразования механических воздействий в оптический сигнал. Наиболее известными материалами обладающими такими свойствами являются сульфиды цинка ZnS:X , (где X=Mn,Cu,Al) и алюминаты легированные редкоземельными элементами $MeAl_2O_4Re$, где Me=Ca, Sr, Re=Eu^{2+}, Dy^{3+}. С 1998 года в ИПЛИТ РАН ведутся работы по исследованию МЛ металлов, алюминатов $MeAl_2O_4Re$ и фотополимерных материалов см.работы /13-29/. Механолюминесцентные свойства алюминатов $MeAl_2O_4Re$ определяются особенностями расположения энергетических уровней активатора (Eu^{2+}), соактиватора (Dy^{3+}) и собственных дефектов. Наблюдаемое в эксперименте поведение механолюминесценции хорошо согласуется с дислокационным механизмом ее возбуждения.

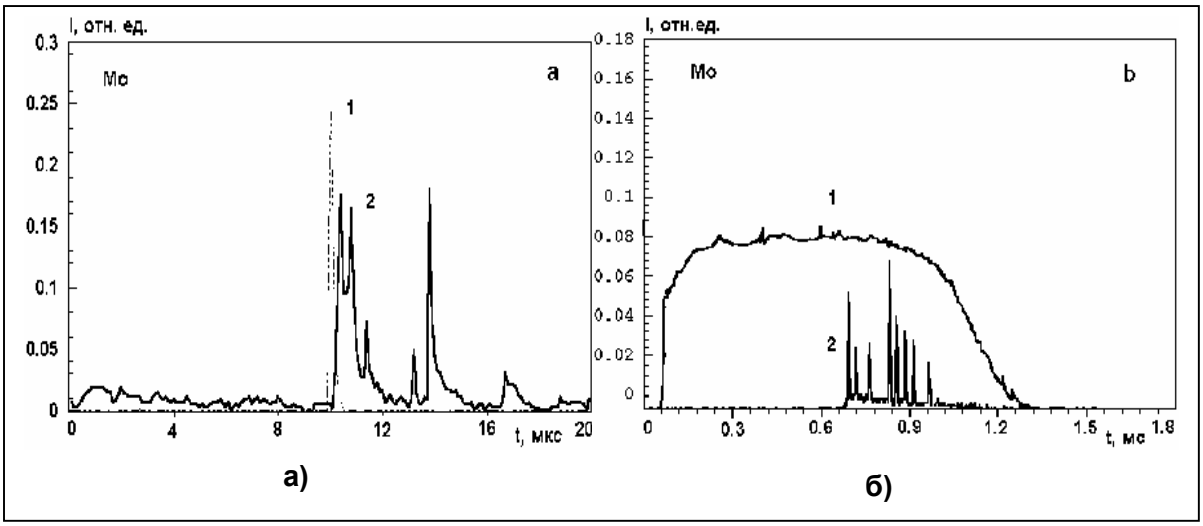


Рис.9. Механолюминесценция молибденовой пленки (толщина пленки h≈1 мкм) возбуждаемая термодеформациями возникающими при воздействием лазерных импульсов. Механолюминесценция возникает в результате взаимодействия зернограничных дислокация с примесями при пластической деформации пленки.

1-лазерный импульс, 2- механолюминесценция
a) $I_{las} \approx 1.0\times10^6$ Вт/см^2, $\tau_{las} \approx 0.3$ мкс.,
b) $I_{las} \approx 2.3\times10^3$ Вт/см^2, $\tau_{las} \approx 1.4$ мс.,

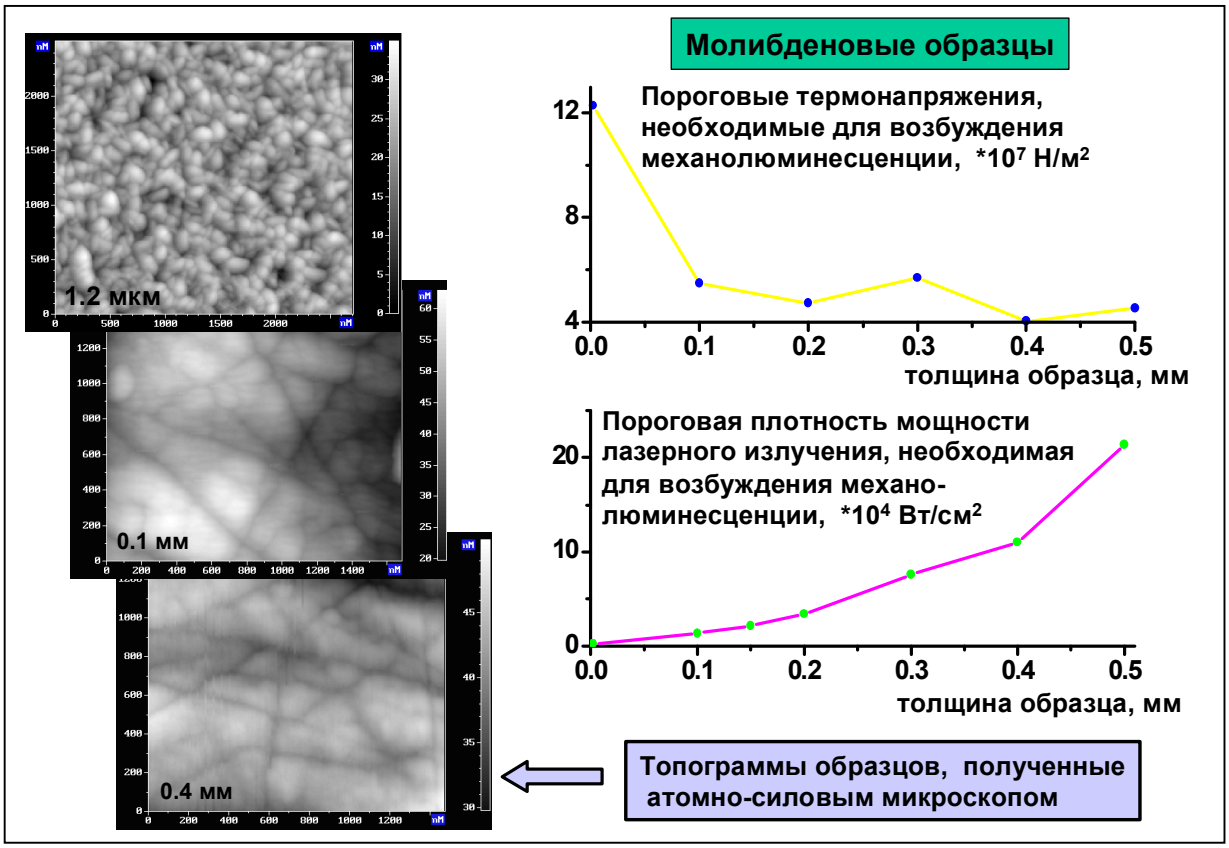


Рис.10. Топограммы поверхности пленок (а) и пластин (б, в) полученные с помощью атомно-силового микроскопа. Пленки имеют поликристаллическую мелкозернистую структуру. Пластическая термодеформация пленок происходит в результате зернограничного проскальзывания при воздействии лазерных импульсов. Взаимодействие зернограничных дислокаций с примесями находящимися в межзеренной области приводи к возбуждению МЛ.

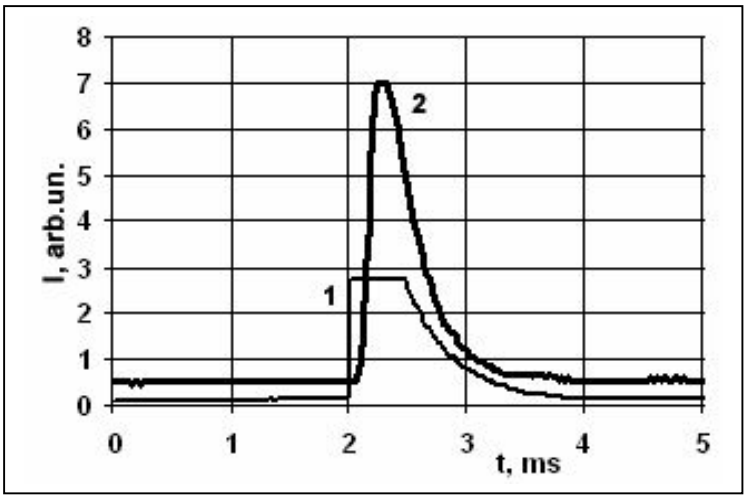


Рис.11. Механолюминесценция $SrAl_2O_4:Eu^{2+}$ возбуждаемая в результате механического удара: 1- форма механического удара, 2- механолюминесценция возбуждаемая механическим ударом

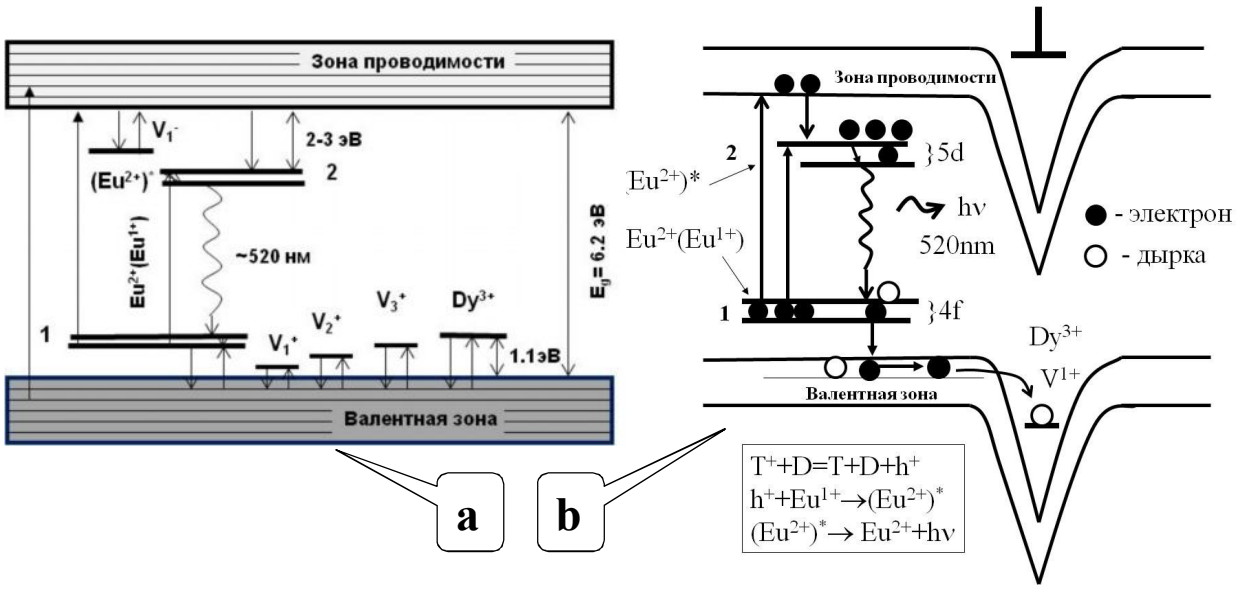


Рис.12. Структура энергетических уровней центра свечения ЦС (Eu^{2+}) и ловушек ($T^+ = V_1^+$, V_2^+, V_3^+, Dy^{3+}) в твердом растворе $SrAl_2O_4$:(Eu^{2+},Dy^{3+}): a)- вдали от дислокации, b)- в окрестности дислокации (механизм возбуждения механолюминесценции)

Известно, что в окрестности дислокации происходит искривление энергетических зон и уровней. Согласно этому механизму, при пластической деформации (при механическом ударе или воздействии лазерного импульса) активируется движение дислокаций. Если в окрестности движущейся дислокации окажется ловушка (в данном случае ион диспрозия с захваченной дыркой, т.е. ион Dy^{4+} или собственный дефект), то может реализоваться ситуация показанная на рис.13b. Энергетический уровень ловушки может оказаться ниже потолка валентной зоны и в результате возможен переход захваченной дырки с уровня ловушки в валентную зону и образование свободной дырки в валентной зоне. Возникшие таким образом свободные дырки двигаясь по кристаллу сталкиваются и взаимодействуют с метастабильными ионами европия Eu^{1+}. В результате ионы Eu^{1+} излучательно распадаются по схеме написанной на рис. 13b. Таким образом в процессе пластической деформации указанных материалов формируется сигнал механолюминесценции. При многократном нагружении происходит опустошение ловушек, что и приводит к падению сигнала механолюминесценции.

Основные публикации:

1. V.N.Bagratashvili, A.F.Banishev, S.A.Gnedoy, V.I.Emel'yanov, A.N.Jerikhin, K.S.Merzljakov, V.Ya.Panchenko, V.N.Seminogov. "Formation of Periodic Ring Structures of Relief and Voids Under Laser Vapor Deposition of Metallic Films", **Appl. Phys. A, 52, 438(1991).**

2. А.Ф.Банишев, Б.Л.Володин, В.И.Емельянов, К.С.Мерзляков, "Образование периодических структур дислокаций при лазерном воздействии на поверхность полупроводников", **ФТТ, т.32, N9, 2529(1990).**

3. А.Ф.Банишев, Чистяков И.М., "Динамика развития микрорельефа на поверхности кремния под действиием мощного лазерного импульса", **Квантовая электроника, т.19, N5, 449(1992).**

4. A.F.Banishev, V.I.Emel'yanov, M.M.Novikov, "Defect Odering and Changes in Silicon Surface Morphology under Linearly Polarized Millisecond Pulsed Laser Irradiation", **Laser Physics, Vol.2, No.2, 178(1992).**

5. А.Ф.Банишев, М.М.Новиков, "Структурные изменения поверхности кремния под действием лазерного излучения", **Физика и химия обработки материалов, N1, 50(1992).**

6. А.Ф.Банишев, Л.В.Новикова, “Образование обратимых и необратимых структурных дефектов на поверхности кремния под действием лазерного импульса”, **Физика и химия обработки материалов, N4, 55(1992).**
7. А.Ф.Банишев, В.С.Голубев, В.Д.Дубров, “Влияние внешнего давления и типа газа на механизм и скорость пробивки металлов импульсами YAG:Nd-лазера”, **Квантовая электроника, т.23, N11, 1029(1996).**
8. А.Ф.Банишев, Е.А.Балыкина, “Разрушение поверхности кремния и меди при импульсном и импульсно-периодическом воздействии YAG:Nd-лазера”, **Квантовая электроника, N6, 557(1997).**
9. А.Ф. Банишев, В.С.Голубев, А.Ю.Кремнев, “Разрушение поверхности кремния в твердой фазе при воздействии импульсов YAG:Nd-лазера”, **Квантовая электроника, 25, №10, 941(1998)**
10. А.Ф. Банишев, В.С.Голубев, А.Ю.Кремнев. Влияние дефектообогащенного поверхностного слоя на динамику деформации поверхности кремния при воздействиии импульсного и импульсно-периодического лазерного излучения. **Известия РАН, сер.физ.,Т.63, №10, 1964(1999).**
11. А.Ф. Банишев, В.С.Голубев, А.Ю.Кремнев, “Инициируемая воздействием лазера аномальная диффузия кислорода в обогащенном дефектами поверхностном слое кремния”, **Письма в ЖТФ, Т.26, вып.2, 8(2000).**
12. А.Ф. Банишев, В.С.Голубев, А.Ю.Кремнев, “Генерация и накопление дислокаций на поверхности кремния при воздействии импульсно-периодического излучения YAG:Nd-лазера”, **ЖТФ, 71, №8, 33(2001).**
13. А.Ф. Банишев, В.Я. Панченко, А.В. Шишков. “Особенности механолюминесценции тонких металлических пленок возбуждаемой длинными и короткими лазерными импульсами”, **Письма в ЖТФ, т.30, вып.6, 67(2004).**
14. А.Ф.Банишев, В.С.Голубев, А.Ю.Кремнев. “Влияние внешней атмосферы и типа газа на генерацию дефектов и разрушение поверхности кремния при воздействии лазерных импульсов”, **ЖТФ, т.74, вып.8, 81(2004).**
15. А.Ф. Банишев, В.С.Голубев, А.Ю.Кремнев, “Разрушение поверхности кремния при импульсном и импульсно-периодическом воздействии лазерных импульсов”, ***Современные лазерно-информационные и лазерные технологии*, Сборник трудов ИПЛИТ РАН под редакцией член-корр. РАН В.Я.Панченко и проф. В.С.Голубева, Интерконтакт Наука, 2005, с.78-91.**
16. А.Ф.Банишев, А.М.Павлов, Формирование структур дислокаций в приповерхностном слое кремния при воздействии лазерного излучения с микроструктурированным распределением интенсивности, **Физика и химия обработки материалов, 2008, №6, с.11-17**
17. А.Ф.Банишев, А.М.Павлов, Формирование нано-микроструктур дефектов в кремнии при воздействии лазерного излучения, **Сборник докладов, XII-международная научная конференция «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул в лазерных, плазменных и нанотехнологиях», 2008г., с.168-175**
18. А.Ф.Банишев, В.Я.Панченко, А.В.Шишков, “Нетепловое свечение поверхности металлов инициируемое термодеформациями при воздействии лазерных импульсов”, **ФТТ, т.41, вып.9, 1538(1999)**.
19. А.Ф. Банишев, В.Я. Панченко, А.В Шишков. “Нетепловое свечение поверхности W, возникающее при импульсном лазерном воздействии”, **Известия РАН, сер.физ., Т.63, №10, 2013(1999).**
20. A.F.Banishev, V.Ya.Panchenko, A.V.Shishkov. “Laser-induced radiative rising of defects on surface and metal surface destruction“. **Appl. Surface Science, vol.153, N2-3, (166-171)2000.**
21. A.F.Banishev, V.Ya.Panchenko, A.V.Shishkov, “Investigation of the Mechanoluminescence Spectrum of Tungsten Excited with Laser Pulses”, **Laser Physics, №8, vol.11, 926(2001).**

22. А.Ф.Банишев, В.Я.Панченко, А.В.Шишков, “Исследование спектра нетеплового свечения поверхности вольфрама в результате импульсной пластической термодеформации”, **Поверхность, №6, 48(2002)**
23. А.Ф.Банишев, В.Я.Панченко, А.В.Шишков, “Исследование деформационно-стимулированного, нетеплового свечения тонких металлических пластин и пленок”, **Известия РАН, сер.физическая, т.66, №7, 976(2002).**
24. А.Ф. Банишев, В.Я. Панченко, А.В. Шишков. “Нетепловое свечение тонких металлических пластин и пленок возбуждаемое воздействием лазерных импульсов”, **ЖТФ, т.73, №5, 90(2003).**
25. А.Ф. Банишев, В.Я. Панченко, А.В. Шишков. “Особенности механолюминесценции тонких металлических пленок возбуждаемой длинными и короткими лазерными импульсами”, **Письма в ЖТФ, т.30, вып.6, 67(2004).**
26. А.Ф. Банишев, В.Я. Панченко, А.В. Шишков, “Люминесценция тонких металлических пластин и пленок, возбуждаемая пластическими деформациями при воздействии лазерных импульсов**”, *Современные лазерно-информационные и лазерные технологии*, Сборник трудов ИПЛИТ РАН под редакцией член-корр. РАН В.Я.Панченко и проф. В.С.Голубева, Интерконтакт Наука, 2005, стр.91-104.**
27. А.Ф.Банишев, В.А.Большухин, А.Д.Азаров, Механолюминесценция мелкодисперсного порошкообразного твердого раствора SrAl2O4:(Eu2+,Dy3+) возбуждаемая воздействием лазерных импульсов, **Физика и химия обработки материалов, 2008, №3, с.24-27**
28. А.Ф.Банишев, В.А.Большухин, А.Д.Азаров, Механолюминесценция мелкодисперсного порошкообразного твердого раствора SrAl2O4:(Eu2+,Dy3+) возбуждаемая воздействием лазерных импульсов, **Сборник докладов, XII-международная научная конференция «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул в лазерных, плазменных и нанотехнологиях», 2008г, с.176-178**
29. Банишев А.Ф., Банишев А.А., Большухин В.А., Сыров Ю.В., Хорт А.М., Механолюминесценция и фотолюминесценция мелкодисперсных порошков и пленок на основе твердых растворов $SrAl_2O_4$:(Eu^{2+},Dy^{3+}), **Физика и химия обработки материалов, 2010, №2, с.60-65**