

РЕФЕРАТ

Отчет 56 с., 25 рис., 3 табл., 60 источн.

ГЕТЕРОПОРФИРИНЫ, ГАЛОХРОМИЯ, СПИН-ОРБИТАЛЬНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ, ТАНТАЛ, ИОННО-ЛУЧЕВОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ, ИОННО-АССИСТИРОВАННОЕ ОСАЖДЕНИЕ, ВОЛНЫ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА, ЭФФЕКТ ФАРАДЕЯ, МАГНИТОПЛАЗМЕННОЕ ОТРАЖЕНИЕ, КОНЦЕНТРАЦИЯ НОСИТЕЛЕЙ, ЭФФЕКТИВНАЯ МАССА, ЛАЗЕРНАЯ АБЛЯЦИЯ В ЖИДКОСТИ; НАНОРАЗМЕРНЫЕ ЧАСТИЦЫ, ДЕТАНАЦИОННЫЕ НАНОАЛМАЗЫ, ФРЕЗЕРНЫЙ ИНСТРУМЕНТ.

Объекты исследования – гидрофильные 21-тиа-5,10,15,20-тетра-(4-сульфофенил)-порфирин и 5,10,15,20-тетра-(4-сульфофенил)-порфирин; кристаллические сферические наночастицы; слои на поверхности тантала, полученные при легировании ускоренными ионами переходных металлов; тонкие пленки фталоцианина меди (CuPc) и N,N'-диметилдиимид 3,4,9,10-перилентетракарбоновой кислоты (PTCDI); структуры Me/Si (Me = Cr, Ti, Zr), полученные методом ионно-ассистированного осаждения в вакууме; гальванические покрытия никеля (Ni) и ультрадисперсных алмазов детанационного синтеза (ДНА) Ni-ДНА, ножи фрезы из быстрорежущей стали HS 18-0-2-5 с покрытием из карбидов молибдена MoC и Mo₂C; характеристики пропускания полупроводниковых материалов в микроволновой области а магнитном поле; лазерно-индуцированная плазма в жидкости.

Цель работы – установить взаимосвязь степени неплоскостных искажений макроцикла и силы спин-орбитальных взаимодействий; разработка численно-аналитических методов статистического описания кристаллических систем; исследование каталитических свойств легированных переходными металлами слоев на поверхности тантала; установление возможности определения методом фотоассистированной сканирующей зондовой электро-силовой микроскопии Кельвина типа проводимости органических молекулярных материалов входящих состав гетероструктур на основе CuPc и PTCDI; установление особенностей и закономерностей ионно-ассистированного осаждения покрытий на основе Cr, Ti и Zr на Si, полученные знания могут быть использованы для создания ионно-лучевых технологий осаждения покрытий; сформировать износостойкие покрытия на основе никеля и ДНА, карбидов молибдена MoC и Mo₂C на стальных ножах дереворежущего инструмента методами гальванической и конденсации с ионной бомбардировкой (КИБ) обработки. Исследовать структуру, фазовый состав и физико-механические свойства сформированных слоев; разработка методики эффективного управления пропусканием полупроводниковой пластины в микроволновой области, помещенной в магнитное поле, с помощью создания большой концентрации носителей; изучение механизмов формирования наночастиц при лазерной абляции в жидкости.

Методы исследования – молекулярная люминесцентная спектроскопия; двухуровневый статистический метод описания неоднородных систем, основанный на одновременном использовании вариационного метода и модифи-

цированного статистического метода условных распределений; циклическая вольтамперометрия; фотоассистированная сканирующая зондовая электро-силовая микроскопия Кельвина, локальная сканирующая туннельная спектроскопия; метод ионно-ассистированного осаждения, резерфордское обратное рассеяние ионов гелия в сочетании с компьютерным моделированием RUMP, методом резонансных ядерных реакций; рентгеноструктурный анализ (РСА), сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), рентгеноспектральный микроанализ (РСМА), энергодисперсионный спектральный рентгеновский анализ (ЭДС), измерения микротвердости, трибометрические измерения; детектирование излучения инфракрасного, миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов; эмиссионная спектроскопия с пространственным и временным разрешением, просвечивающая и сканирующая электронная микроскопия.

Полученные результаты – проведено сравнительное исследование спектрально-люминесцентных характеристик гидрофильных 21-тиа-5,10,15,20-тетра-(4-сульфофенил)-порфирина и 5,10,15,20-тетра-(4-сульфофенил)-порфирина в растворах при температуре 293 К. Впервые обнаружены особенности галохромных эффектов, обусловленные заменой в макроцикле пиррольного кольца тиюфеновым. Установлено, что многоцентровые возмущения на периферии и в ядре макроцикла приводят к модулированию спин-орбитального взаимодействия, которое проявляется в изменении эффективности тушения флуоресценции. Показано, что флуоресценция дважды протонированной формы гетеропорфирина тушится по сравнению со свободным основанием, в то время как у дважды протонированной формы порфирина наблюдается разгорание флуоресценции, что обусловлено различием в неплоскостных искажениях макроцикла.

Проведены численные расчеты с помощью компьютерной программы, разработанной на основе методики исследования структурных и термодинамических характеристик молекулярных сферических кристаллических наночастиц с неоднородным полем плотности. В результате рассчитаны потенциалы средних сил, унарная и бинарная функции распределения, радиальное поле смещений узлов решетки на границе наночастицы, среднеквадратичные отклонения частиц от узлов деформированной решетки, функционалы энтропии, внутренней энергии, свободной энергии и большого термодинамического потенциала наночастицы и окружающей ее флюидной среды. Определены равновесные поля плотности в межфазной области гетерогенной системы при температуре ниже тройной точки.

Исследованы каталитические свойства слоев, полученных на поверхности образцов тантала в процессе ионно-лучевого легирования переходными металлами – платиной как основным каталитическим металлом и гадолинием в качестве активирующей добавки. Установлено, что механизм окисления метанола на исследуемых образцах сходен с механизмом электрохимического окисления метанола на платине. В то же время их активность существенно превышает активность платины.

Фотоассистированная сканирующая зондовая электросиловая микроскопия Кельвина гетероструктур на основе CuPc и PTCDI с различной последовательностью слоев позволяет определить механизм изменения поверхностного потенциала этих образцов, а также подтвердить данные, полученные туннельной спектроскопией, о типе проводимости пленок, входящих в состав гетероструктуры.

Установлено, что при ионно-ассистируемом осаждении на кремний металлосодержащих покрытий на основе Cr, Ti, Zr формируются поверхностные структуры со сложным элементным составом. В состав структур входят атомы осаждаемого металла, атомы кремния из подложки и атомы сопутствующих примесей водорода, углерода и кислорода.

Обоснованы методики послойного осаждения методом КИБ ионно-плазменных покрытий и методом химического осаждения гальванических покрытий на основе ДНА на стальных ножах дереворежущего фрезерного инструмента. На стальной (марки Р6М5) основе сформированы высокопрочные композиционные Ni – ДНА покрытия с низким значением коэффициента трения по стали (0,12–0,15), максимальная микротвердость которых (947 ± 28 HV) превосходит микротвердость стальной основы (700 ± 50 HV). Ni-ДНА покрытия содержат фазы α -Ni, Ni₃P и нанодиамазы.

Исследованы характеристики ножей фрезы из быстрорежущей стали HS 18–0–2–5 с осажденным методом КИБ покрытием из карбидов молибдена MoC и Mo₂C при плоском фрезеровании древесины дуба. Покрытие из карбидов молибдена увеличило износостойкость лезвий ножей и способствовало практически на 40 % увеличению мощности резания при фрезеровании образцов из древесины дуба по сравнению с фрезой с ножами без покрытия. Фрезы с покрытиями из карбидов молибдена на лезвиях ножей показали уменьшение в среднем на 1,5–3 мкм параметра шероховатости *Ra* поверхности древесины дуба по сравнению с инструментом без покрытия во всем диапазоне применяемых скоростей подачи и длины фрезерования.

Полученные результаты позволяют внедрить в производственный процесс разработанные технологии упрочнения инструмента.

Путем анализа кривой пропускания зондирующего излучения определена эффективная масса носителей заряда в пластинке InSb. В продольной геометрии эффективная масса оценивалась по величине сдвига минимума пропускания зондирующего излучения. Регистрируемыми параметрами являлись значения мощности фотовозбуждающего излучения, соответствующие минимальному пропусканию при отсутствии магнитного поля и при его включении. В качестве варьируемого параметра использовалась мощность фотовозбуждения, которая связана с концентрацией генерируемых электронов проводимости и характеристической частотой. Полученное значение эффективной массы находится в удовлетворительном соответствии с известными данными. Показано, что в образцах *n*-Si и *n*-Ge при продольной ориентации магнитного поля постоянная вращения примерно на порядок превышает значение, полученное для поперечного магнитного поля.

На основе спектроскопических измерений получены значения температуры лазерной плазмы, формируемой при импульсном лазерном воздействии на поверхности металлической мишени, погруженной в воду; успешно синтезированы наночастицы серебра с помощью метода ИЛАЗ.

ВВЕДЕНИЕ

Влияние различных периферических заместителей, присоединенных в однотипных положениях макроцикла (т.е. по C_m или C_b атомам) на физико-химические и спектрально-люминесцентные свойства порфиринов аддитивно. Однако, однотипные взаимодействия, локализованные в разных частях тетрапиррольной молекулы, не всегда аддитивны. Поэтому порфириноиды, содержащие в составе макроцикла различные гетероциклы и обладающие ионизирующимися периферическими заместителями, представляют значительный интерес для исследования. Возможности управления их спектрально-люминесцентными свойствами расширяются благодаря многоцентровым взаимодействиям в ядре и на периферии макроцикла. Особенно интересными представляются гетеропорфирины с периферическими заместителями в C_m положениях макроцикла. У этих производных верхняя заполненная молекулярная орбиталь a_{2u} и нижние вакантные молекулярные орбитали e_{gx} и e_{gy} (обозначения даны для точечной группы симметрии D_{4h}) имеют пучности как на C_m атомах углерода, так и на атомах азота (либо гетероатомах). Таким образом, можно управлять распределением электронной плотности в молекуле посредством межмолекулярных взаимодействий на периферии макроцикла.

Проведенные статистические исследования свойств сферических наночастиц в различных агрегатных состояниях являются актуальными в том смысле, что в настоящее время практически повсеместно и весьма интенсивно разрабатываются различные экспериментальные методики получения наноматериалов, содержащих наночастицы, обладающие, как правило, уникальными свойствами.

Для описания равновесных свойств неоднородных конденсированных систем разработан двухуровневый статистический метод [1, 2], который является симбиозом метода коррелятивных функций Боголюбова – Борна – Грина – Кирквуда – Ивона (ББГКИ), метода условных коррелятивных функций Ротта [3] и метода функционалов плотности. Их совместное использование позволило эффективным образом оборвать цепочку интегро-дифференциальных уравнений для коррелятивных функций и решить вопрос о способе нормировки этих функций для неоднородной системы. В результате было получено статистическое выражение для большого термодинамического потенциала Ω , описывающего равновесные характеристики неоднородных систем.

В разработанном подходе ячейки объемом ω_i ($i = 1, 2, \dots, M$), на которые мысленно разделен весь объем V системы, имеют внутреннюю микроструктуру, которая описывается с помощью соответствующих коррелятивных функций \hat{F}_{ii} распределения молекул (или атомов) внутри этих ячеек. Это первый, т. е. микроскопический уровень статистического описания системы многих частиц. Второй, т. е. макроскопический уровень используется для описания их коррелированного распределения по совокупности всех ячеек неоднородной макроскопической системы с некоторым искомым равновес-

ным полем чисел заполнения n_i , определяющих поле плотности неоднородной системы ($\rho_i = n_i / \omega_i$). Микроячейки системы образуют реальную решетку для кристаллического состояния и гипотетическую решетку в случае текучих сред (жидкости или газа). Размеры и форма микроячеек претерпевают существенные изменения вблизи границы кристаллической наночастицы (наблюдается пространственная релаксация параметров кристаллической решетки).

В рамках двухуровневого статистического метода ранее была получена замкнутая система интегральных уравнений для потенциалов ϕ_{ij} средних сил, которые описывают взаимодействие выделенной молекулы конденсированной неоднородной среды в ячейке ω_i с остальными молекулами, статистически распределенными в других ячейках ω_j [4, 5]. Эта общая система уравнений преобразована с целью описания гетерогенной системы «кристаллическая наночастица в однородной газообразной среде». Методика выполненных преобразований системы и ее решение методом итераций с использованием пакета Mathcad подробно изложены в работах [6–8].

Наличие статистического выражение для большого потенциала $\Omega\{n_i\} = F\{n_i\} - \mu \sum n_i$, как функционала искомого поля плотности чисел заполнения n_i микроячеек, позволило в результате варьирования провести расчеты для определения величины адсорбированного вещества на наночастицах разных размеров, а также исследовать пространственную релаксацию параметров ГЦК решетки вблизи границ наночастиц.

Легирование поверхности материалов с применением ионных пучков обеспечивает возможность введения в очень тонкий приповерхностный слой контролируемых количеств любой примеси на атомном уровне в неравновесных условиях. Определенный интерес представляет ионно-лучевое легирование атомами металлов функциональных материалов, свойства которых определяются в основном составом поверхности. К числу таких материалов относятся катализаторы химических реакций, в частности электрокатализаторы (электроды электрохимических устройств).

Материалы, используемые в качестве основы электрокатализаторов, должны обладать электропроводностью, достаточной химической и электрохимической стабильностью. Перечисленным требованиям удовлетворяют так называемые вентильные металлы (алюминий, титан, тантал), на поверхности которых в атмосферных условиях образуются плотные оксидные пленки, защищающие от коррозии.

Одним из таких применений является изготовление электродов электрохимических устройств – электролизеров и топливных элементов [2]. Соответствующие электрохимические процессы в таких устройствах требуют наличия катализаторов. В качестве каталитических используются металлы платиновой группы и другие переходные металлы.

Целью работы явилось исследование каталитических свойств электродов на основе тантала, на поверхности которых сформированы слои, легированные в процессе ионно-ассистированного осаждения переходными металлами.

ми – платиной как основным каталитическим металлом и гадолинием в качестве активирующей добавки.

В настоящее время наблюдается большой интерес к органическим материалам в сфере электроники, которые рассматриваются как альтернатива используемым неорганическим полупроводниковым материалам. Органические молекулярные системы обладают рядом несомненных преимуществ, таких, как их дешевизна, простота изготовления, экологическая чистота производства. Электронные свойства молекулярных материалов изучаются достаточно давно, и в последнее время приоритетными являются работы, которые связаны с развитием новых прикладных разработок в области совершенствования методов сканирующей зондовой микроскопии для локального анализа поверхности тонкопленочных молекулярных материалов.

Сканирующая зондовая микроскопия является одним из мощных современных методов исследования морфологии и локальных свойств поверхности твердого тела, нашедшим широкое применение в различных областях науки и технологии [1]. Фотоассистированная электросиловая микроскопия Кельвина – это метод электросиловой микроскопии Кельвина, дополненный источником внешнего оптического излучения. В сканирующем электросиловом микроскопе исследуемый образец и зазор между кончиком проводящего зонда и поверхностью освещается полупроводниковым лазером, что влияет на величину поверхностного потенциала исследуемой поверхности и способствует выявлению на ней разнородных по своим электронным свойствам участков [2].

Органические полупроводники на основе фталоцианинов и периленов являются перспективными материалами для использования при разработке таких элементов органической электроники, как газовые сенсоры, солнечные элементы и светоизлучающие диоды. Цель данной работы – установить возможность определения методом фотоассистированной сканирующей зондовой электросиловой микроскопии Кельвина типа проводимости органических молекулярных материалов входящих состав гетероструктур на основе фталоцианина меди (CuPc) и N,N'-диметилдиимид 3,4,9,10-перилентетракарбоновой кислоты (PTCDI).

Ионно-лучевые технологии осаждения покрытий являются перспективными методами модифицирования состава и свойств поверхности материалов и изделий [1–3]. Одним из таких методов считается метод ионно-ассистированного осаждения, где в процессе осаждения покрытия происходит одновременное облучение поверхности формируемой структуры ускоренными ионами материала покрытия [1].

Для реализации этого метода использовался вакуумный электродуговой ионный источник, создающий плазму, в которой содержатся ионизированная и нейтральная фракции из материала электродов [1]. Нейтральная фракция, испаряясь во всех направлениях, осаждается и на подложке. А под действием ускоряющей разности потенциалов U между подложкой и источником ионы вытягиваются из разрядного промежутка и под действием элек-

тростатического поля внедряются в поверхность подложки. При этом происходит перемешивание атомов осаждаемого покрытия с атомами подложки, в результате чего формируется покрытие с высокой степенью адгезии к основе.

В процессе ионно-ассистированного осаждения в приповерхностных слоях образца происходят сложные физико-химические процессы, способные существенно изменить распределение элементов покрытия по глубине, вследствие чего может изменяться структура и свойства его поверхности [1–3].

В настоящей работе предпринята попытка определить характер распределения атомов водорода в поверхностных слоях кремния при осаждении покрытий на основе металлов: $Me = Cr, Ti, Zr$, а также установить особенности и закономерности процесса проникновения атомов водорода в покрытие и подложку при ионно-ассистированном осаждении.

Современное развитие технологии деревообработки требует применения износостойкого фрезерного инструмента, выдерживающего большие динамические и вибрационные нагрузки в связи с использованием высоких скоростей резания. Одним из основных критериев оценки качества обрабатываемой поверхности является ее шероховатость, которая определяет дальнейшую обработку и отделку поверхности, внешний вид и увеличивается по мере износа режущего инструмента [1, 2]. Доказано, что наибольшее влияние на шероховатость поверхности оказывают следующие основные факторы: порода древесины, способ фрезерования поверхности, радиус закругления режущей кромки лезвия ножа фрезы, скорости резания и подачи [2, 3]. Результаты исследований [4] показали, что основной причиной абразивного износа лезвия ножа фрезы при обработке древесины является трение поверхности лезвия ножа с древесиной. Показано [3, 5, 6], что химический состав инструментального материала, геометрия инструмента и кинематические параметры резания оказывают значительное влияние на износ кромки лезвия ножа инструмента и период стойкости инструмента, при этом более интенсивный износ кромок лезвий ножей инструмента сопровождается эффектом увеличения мощности резания при увеличении подачи на резец. В быстрорежущих инструментальных сталях больше легирующих элементов, что увеличивает твердость, прочность и износостойкость инструмента. Для многих процессов резания древесины интерес к быстрорежущим инструментальным сталям остается очень важным из-за возможности их высокой степени заострения для использования в качестве режущей кромки лезвия ножа инструмента. Тем не менее, возможен быстрый химический износ стального ножа инструмента из-за коррозии и механического износа, который объясняется присутствием экстрактивных веществ и кремнезема в древесине и древесных композитах. Было обнаружено [7], что кремнезем и экстрактивные вещества определяли абразивный и коррозионно-окислительный износ быстрорежущей стали при резке древесины сосны, древесностружечной плиты, древесно-цементной плиты и др.

В настоящее время в промышленности широко применяются композиционные электрохимические покрытия (КЭП) на основе никеля [8], интерес к

которым вызван уникальным комплексом присущих этим материалам физико-химических и механических свойств. Использование детонационных наноалмазов (ДНА) [9] при электрохимическом осаждении хрома, никеля, цинка приводит к получению покрытий с высокими эксплуатационными характеристиками, такими как микротвердость, износостойкость, коррозионная стойкость. Ni-ДНА КЭП улучшают долговечность инструментов, однако никелевая матрица не обладает высокими прочностными характеристиками и износостойкостью [10]. Поэтому безэлектролизное осаждение металлических покрытий – один из перспективных методов защиты от коррозии, поскольку позволяет получать практически беспористые, однородные по толщине покрытия на деталях сложного профиля [11].

Установлено, что одним из наиболее эффективных способов обработки поверхности лезвий ножей фрезерного инструмента с целью сохранения остроты режущей кромки лезвия является метод КИБ, с помощью которого сформированные покрытия увеличивают период стойкости инструмента [12].

Поэтому, актуальной научной задачей является изучение влияния осаждения методом КИБ покрытий из карбидов молибдена, обладающих значительной твердостью, на износостойкость деревообрабатывающего инструмента из быстрорежущей стали, а также и исследование структуры, фазового состава и механических свойств сформированных слоев на основе Ni-ДНА покрытий.

В настоящее время для определения параметров электронного переноса в полупроводниках, таких как скорости поверхностной и объемной рекомбинации и длина диффузии носителей заряда, применяются бесконтактные методы с использованием излучений миллиметрового и видимого диапазонов [1–3]. Методы, основанные на измерении фотопроводимости в поперечном (геометрия Фойгта) и продольном (геометрия Фарадея) магнитном поле по отношению направлению зондирующей волны применялись для определения рекомбинационных параметров носителей заряда в эпитаксиальных пленках Cd-Te [4,5]. Методика на основе эффекта магнитного вращения плоскости поляризации зондирующего излучения в миллиметровом диапазоне позволяет оценить такие параметры, как подвижность, эффективная масса носителей заряда и время релаксации. Величину подвижности носителей можно получить из измерений угла поворота плоскости колебаний электрического вектора зондирующей волны при различной ориентации внешнего постоянного магнитного поля. Значительную информацию о параметрах электронного переноса дает применение магнитоплазменного отражения. Характеристические частоты, при которых коэффициенты пропускания зондирующего излучения достигают своих экстремальных значений, зависят от концентрации и эффективной массы носителей заряда в полупроводнике, а также от взаимной ориентации вектора внешнего постоянного магнитного поля и волнового вектора зондирующего излучения. Магнитоплазменная и циклотронная частоты, а также частота столкновений, определяющая время релаксации носителей, находятся в области частот, где все полупроводниковые материалы

сравнительно слабо поглощают излучение миллиметрового и дальнего ИК-диапазона.

Изменение значений характеристических частот может достигаться варьированием внешних параметров – магнитной индукции, напряженности электрического поля, температуры полупроводника, мощности зондирующего излучения. Изменение этих параметров в значительных пределах обеспечивает возможность достижения резонанса путем зондирования излучением фиксированной частоты при параметрическом изменении характеристических частот полупроводника. В данной работе предложена методика определения эффективной массы электронов в полупроводниковом образце из измерений коэффициента пропускания на магнитоплазменных частотах. Приведены результаты измерения угла поворота плоскости поляризации в продольном и поперечном магнитных полях. Сопоставляются чувствительности этих измерительных схем.

Импульсная лазерная абляция в жидкостях (ИЛАЖ) для получения коллоидных наночастиц (НЧ) широко изучается в последние десятилетия благодаря ряду перспективных преимуществ, среди которых: экологичность, простота реализации, возможная долговременная стабильность получаемых НЧ [1]. Недавние исследования показали важность начальной стадии плазмы и динамики кавитационных пузырьков в процессах, приводящих к зарождению и образованию НЧ в растворе [2]. В связи с этим важными и актуальными являются исследования, направленные на установление особенностей плазмообразования и определение параметров лазерно-индуцированной плазмы в жидкостях, выяснение влияния параметров плазмы на процессы роста наночастиц, являющиеся предметом настоящего исследования.

В настоящей работе для определения параметров лазерной плазмы в жидкости применена методика, основанная на регистрации и анализе спектров непрерывного излучения, предложенная ранее в [2]. По результатам спектроскопической диагностики рассмотрены особенности инициирования и эволюции лазерной плазмы серебряной мишени в воде в режиме генерации НЧ. С помощью изображений плазмы с временным и спектральным разрешением в области пропускания узкополосных фильтров получена информация о пространственных распределениях параметров плазмы при различных временных задержках с момента образования плазмы. В экспериментах в качестве источника для абляции использовался YAG:Nd-лазер (LOTIS TII, модель S-2131D), работающий на частоте основной гармоники (1064 нм) с длительностью импульса 10 нс и частотой следования импульсов 10 Гц. Энергия лазерных импульсов могла варьироваться в диапазоне 20–80 мДж. Лазерное излучение после телескопа фокусировалось кварцевым конденсором на мишень, помещенную в кювету с кварцевыми окнами, заполненную дистиллированной водой. Изображения плазмы снимались через интерференционные фильтры на длинах волн 486 и 550 нм с полной шириной на полувысоте 10 нм. Изображения плазмы получали с временным разрешением при ширине ворот 10 нс. Полученные изображения качественно характеризуют структуру

плазменного факела, иллюстрируя особенности пространственного распределения частиц плазмы в нем. Непрерывный спектр излучения плазмы обусловлен двумя причинами: тормозным излучением свободных электронов в электрическом поле положительных ионов и излучением при захвате свободных электронов положительными ионами (рекомбинационное излучение). Из-за сильной (экспоненциальной) зависимости интенсивности излучения от частоты свободное свободное излучение дает наибольший вклад только в низкочастотной области спектра. Распределение энергии в видимой области спектра при низких температурах полностью определяется экспоненциальным множителем, и если это распределение измеряется в относительных единицах в некоторый фиксированный момент времени при заданных значениях n_e и T_e , то можно оценить температуру. В качестве примера показана карта распределения интенсивности излучения лазерной плазмы, индуцированной абляцией серебряной мишени в воде, наблюдаемой с фильтрами 550 и 486 нм при различных задержках от лазерного импульса.