

Высокоэффективная визуализация произвольно ориентированных одиночных молекул вблизи металлической поверхности

Степан Бойченко,

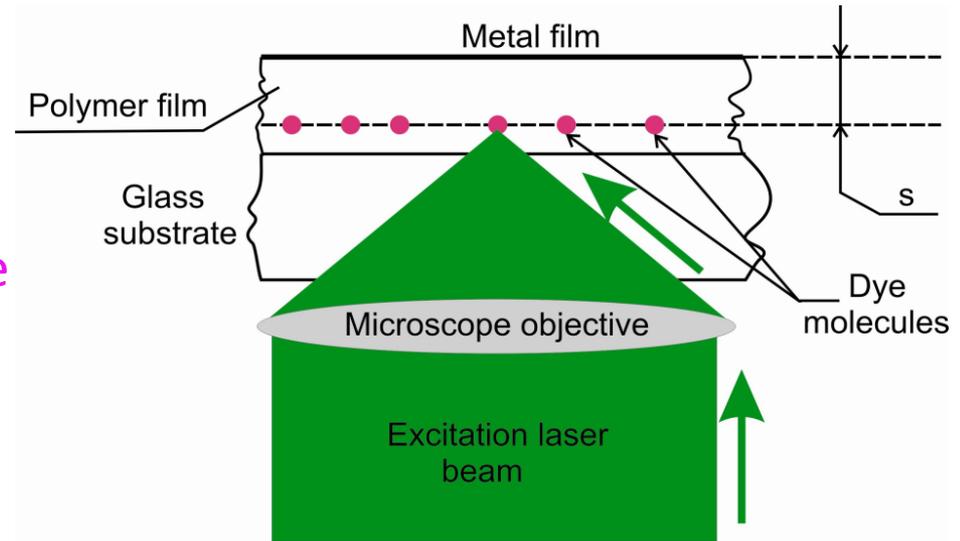
Иркутский филиал Института лазерной физики
СО РАН

*ул. Лермонтова, 130а, 664033, Иркутск,
Россия*



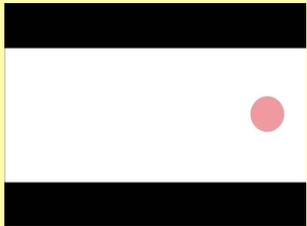
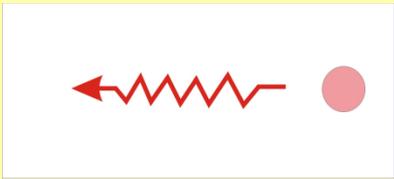
Краткое содержание

В данной работе моделируется визуализация произвольно ориентированных одиночных молекул родамина 6G, находящихся в полимерной плёнке под металлической поверхностью (серебро), основанная на лазерной конфокальной сканирующей микроскопии.



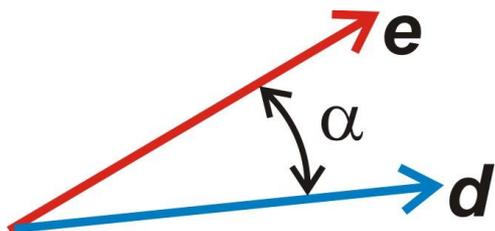
Пространственные неоднородности (в частности, металлические поверхности) способны изменять флуоресцентные свойства квантовых наноэмиттеров (молекул красителей, квантовых точек, центров окраски и т.п.). Данная возможность представляет интерес для современной нанооптики (например, разработка источников одиночных фотонов, наблюдение молекул со слабым квантовым выходом флуоресценции).

Флуоресцентная микроскопия как средство визуализации одиночных молекул

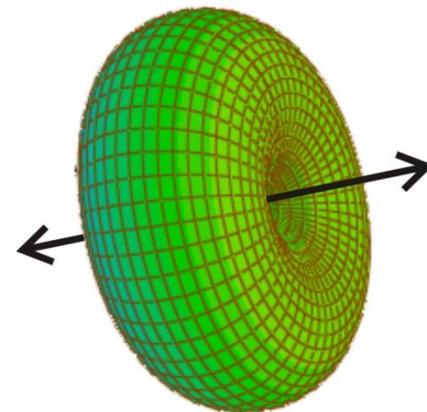
1	Одиночный квантовый эмиттер (молекула красителя, квантовая точка и т.п.) возбуждается.	
2	Квантовый эмиттер испускает фотон.	
3	Флуоресценция эмиттера собирается, и строится его флуоресцентное изображение.	

В данных экспериментах требуется

1. Возбудить как можно больше эмиттеров
2. Собрать как можно больше флуоресценции



$$P_{exite} \propto (\cos \alpha)^2$$



Лазерная сканирующая конфокальная флуоресцентная микроскопия (ЛСКФМ) как средство визуализации ПООМ

Среди прочих методик люминесцентной микроскопии, ЛСКФМ представляется одной из наиболее перспективных. В связи с этим наши исследования посвящены ей.

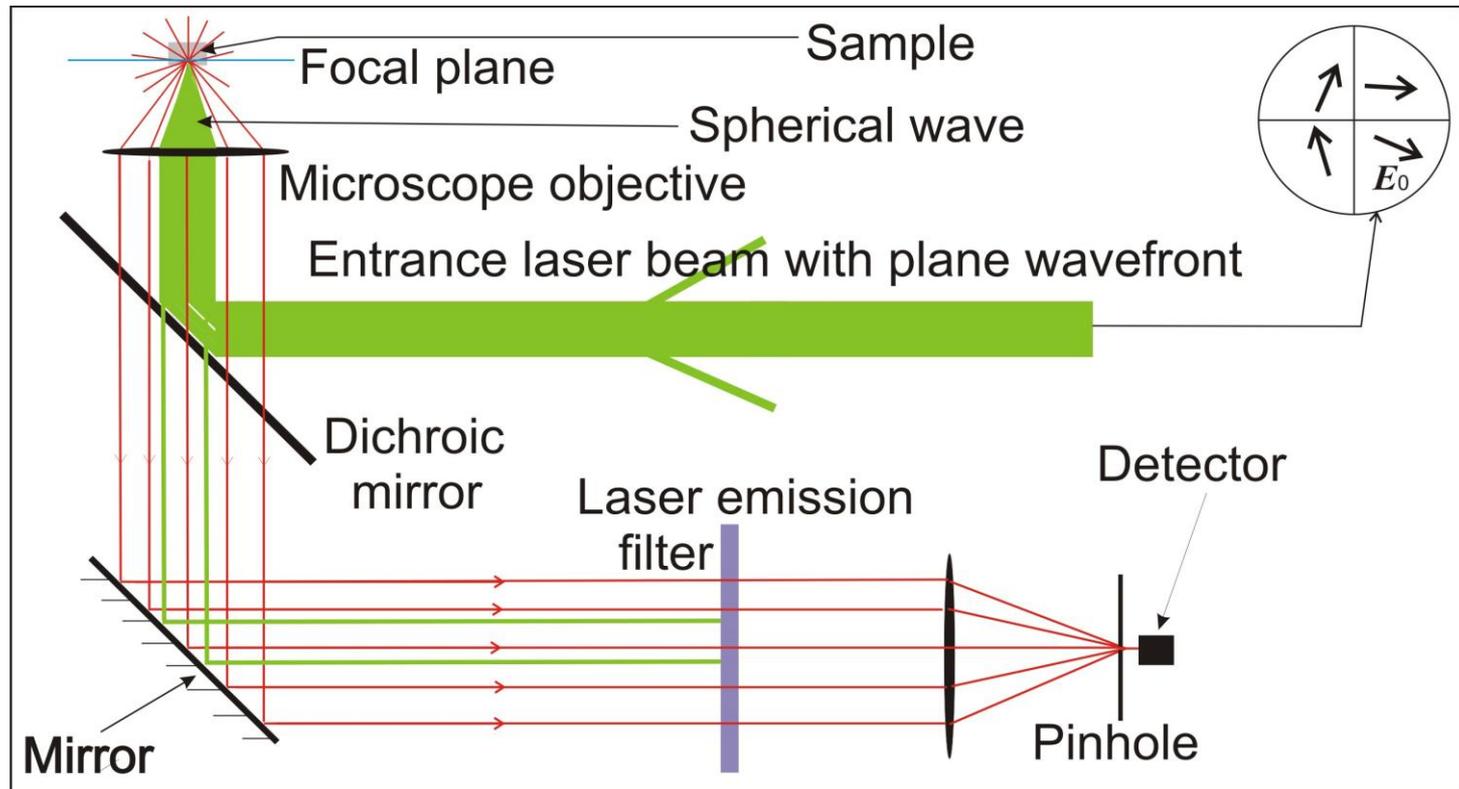
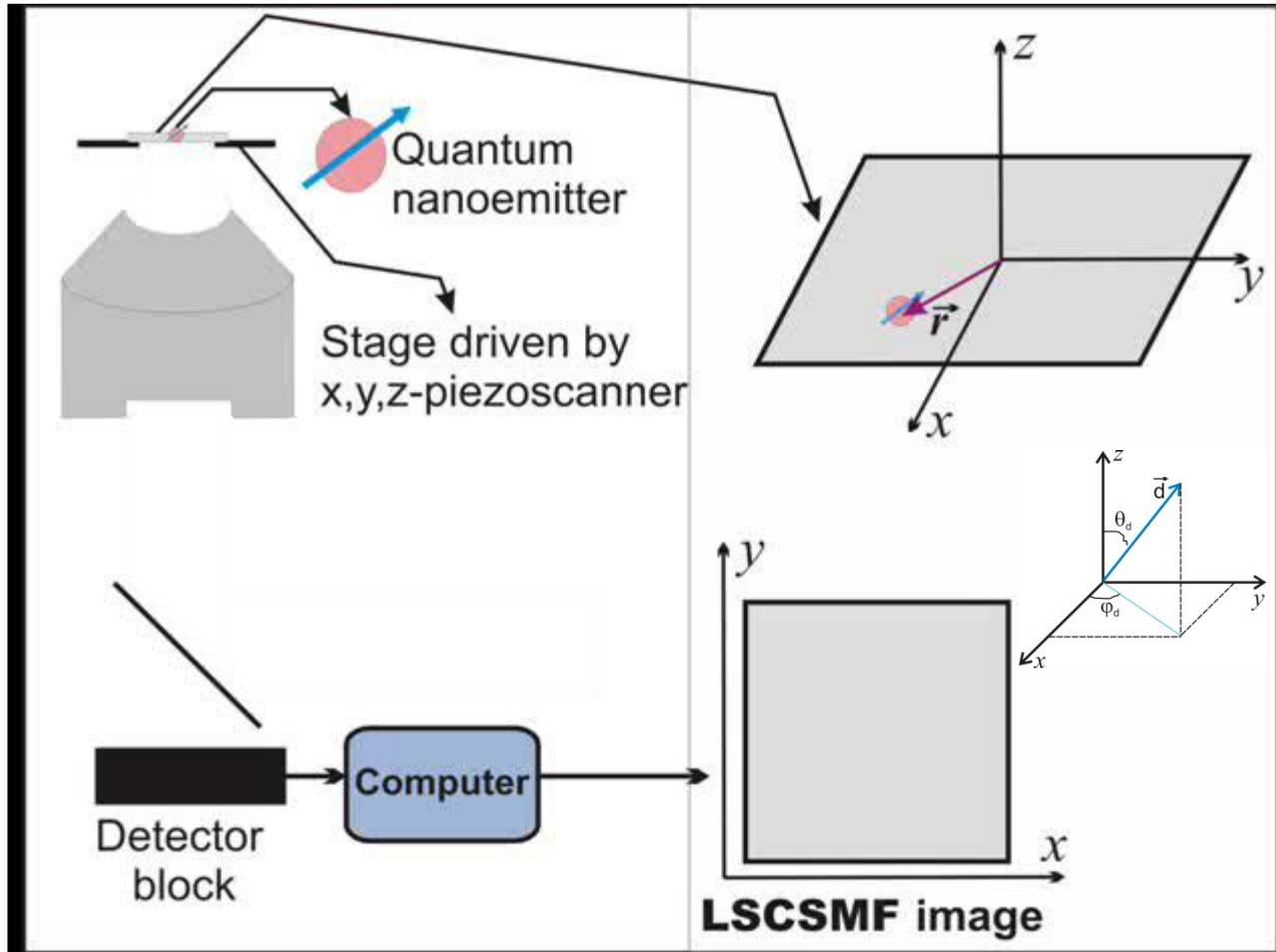


Схема лазерного сканирующего флуоресцентного микроскопа.

Построение изображения посредством ЛСКФМ



При выполнении эксперимента нужно
 (1) возбудить молекулу (2) собрать испущенную флуоресценцию.

Вероятности процессов (1) и (2)

$$(1) P_{ex} \sim |\vec{d} \vec{E}|^2$$

$$(2) P_c \sim \frac{\iint_{\Omega_0} J(\vec{d}, \vec{n}) d\Omega(\vec{n})}{\iint_{4\pi} J(\vec{d}, \vec{n}) d\Omega(\vec{n})}$$

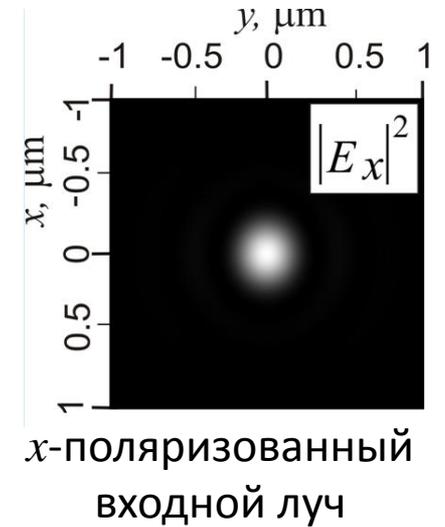
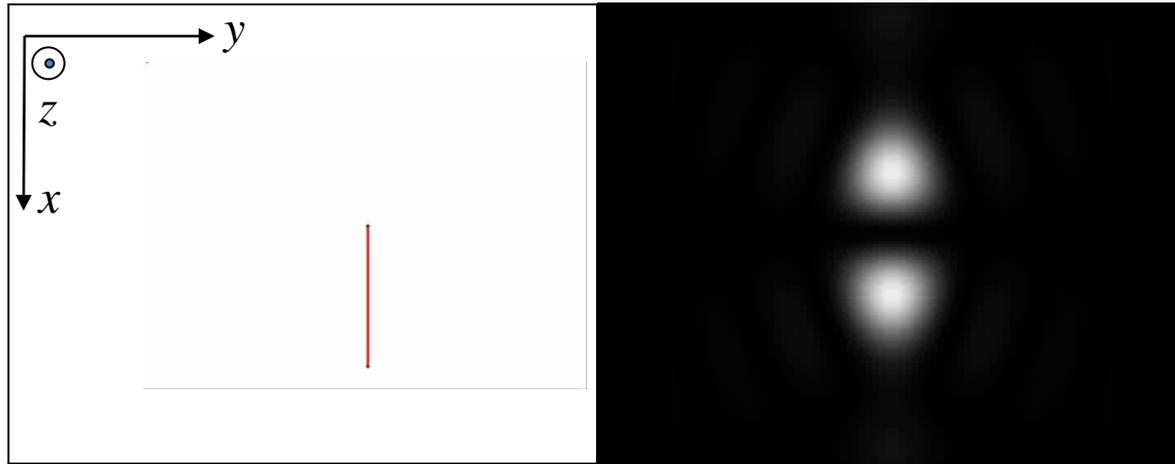
Интенсивность в точке ЛСКФМ изображения:

$$I_{im} \sim P_c P_{ex} \sim P_c(\vec{d}) |\vec{d} \vec{E}(\vec{r})|^2$$

Поляризацию входного луча можно менять (задавать).

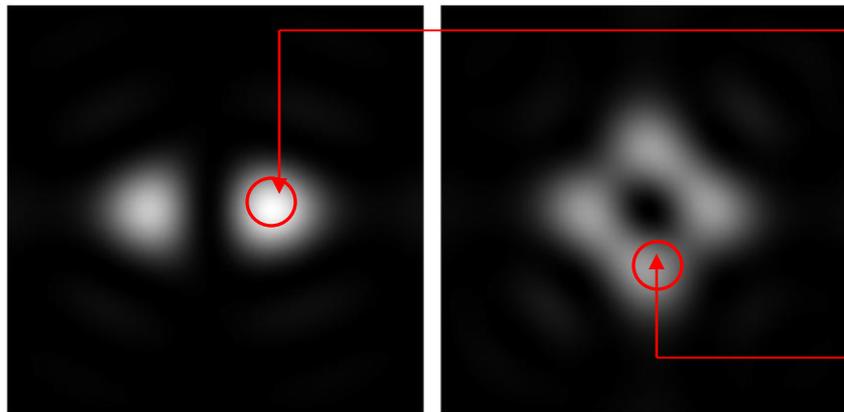
Сравнение «наименее яркой» и «наиболее яркой» ориентации как способ описания эффективности визуализации ОМ

Распределение вектора светового поля в фокальной области зависит от поля входного луча. Это позволяет управлять полем в фок. области, меняя поле входного луча.



Эффективность визуализации произвольно ориентированных молекул

$\vec{E}_0 = \begin{pmatrix} -1 \\ i \\ 0 \end{pmatrix}$	$\vec{E}_0 = \begin{pmatrix} 1 \\ i \\ 0 \end{pmatrix}$
$\vec{E}_0 = \begin{pmatrix} -1 \\ -i \\ 0 \end{pmatrix}$	$\vec{E}_0 = \begin{pmatrix} 1 \\ -i \\ 0 \end{pmatrix}$

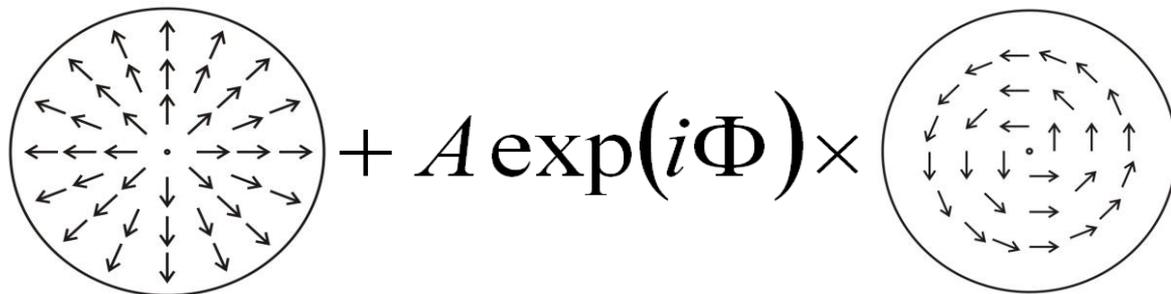


$$\max(I_{\text{bright}})$$

$$\mathcal{E} = \frac{\max(I_{\text{dim}})}{\max(I_{\text{bright}})}$$

$$\max(I_{\text{dim}})$$

Визуализация произвольно ориентированных ОМ с помощью эллиптически поляризованных векторных пучков

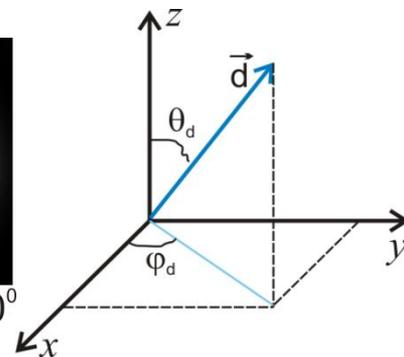
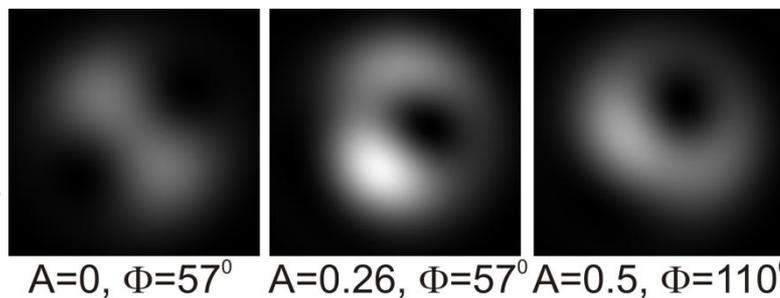


A и Φ – параметры эллиптичности. Их можно варьировать.

Радиально поляризованный луч

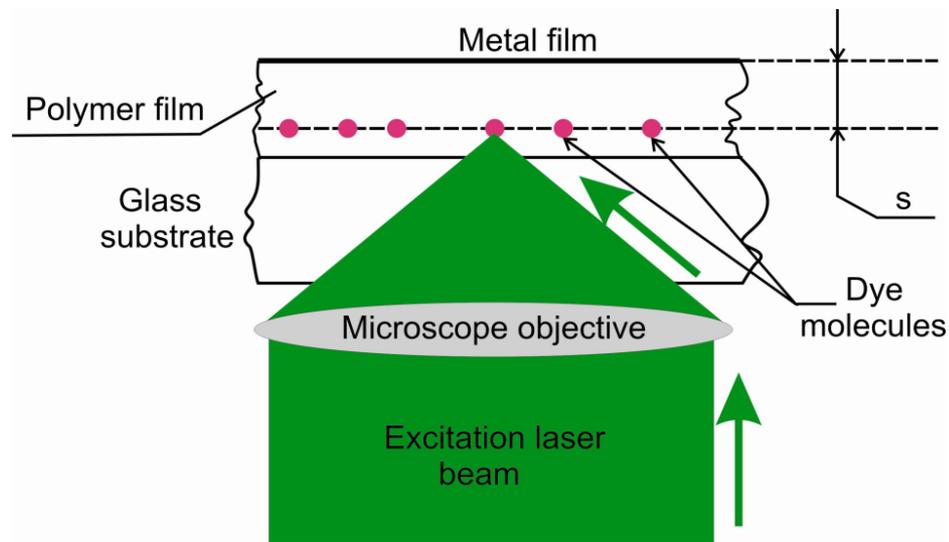
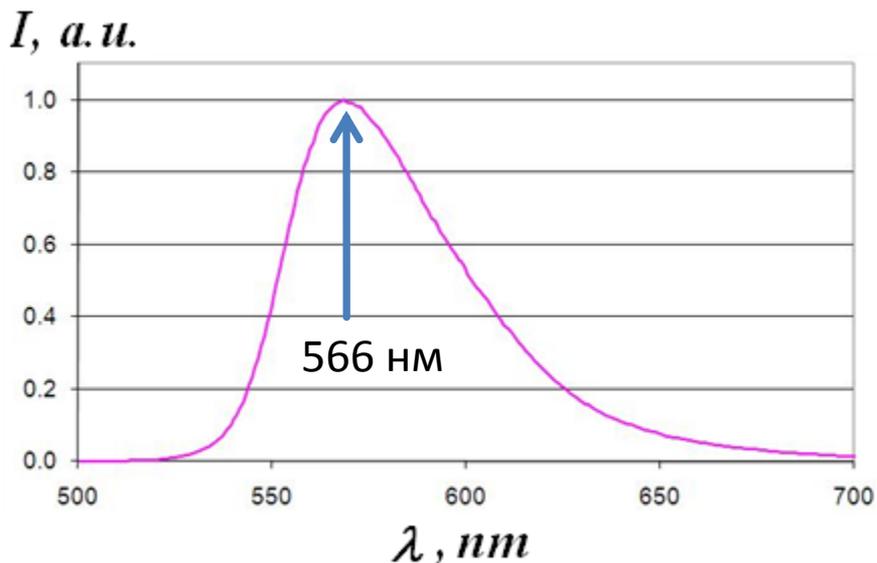
Азимутально поляризованный луч

Изображение молекулы заданной ориентации зависит от параметров эллиптичности.



Параметр эффективности визуализации ПООМ зависит от параметров эллиптичности: $\varepsilon = f(A, \Phi)$. За счет этого мы можем максимизировать ε -параметр по A и Φ .

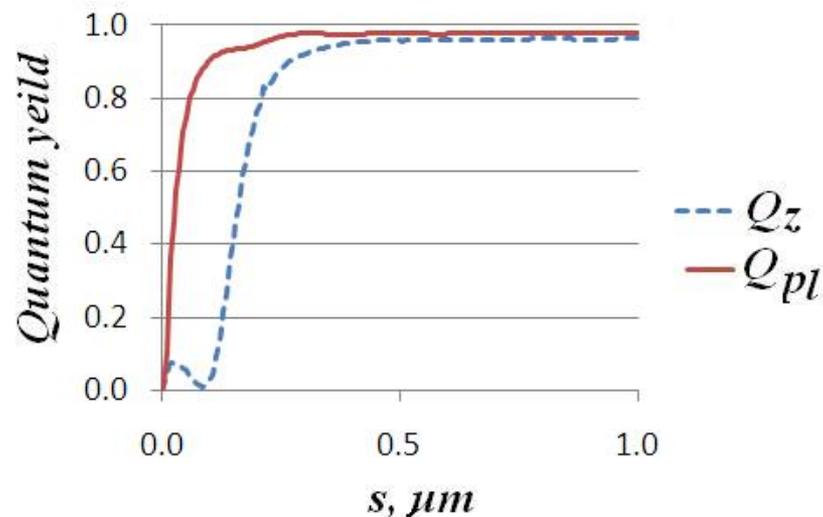
Визуализация ПООМ родамина 6G вблизи плоской серебряной поверхности



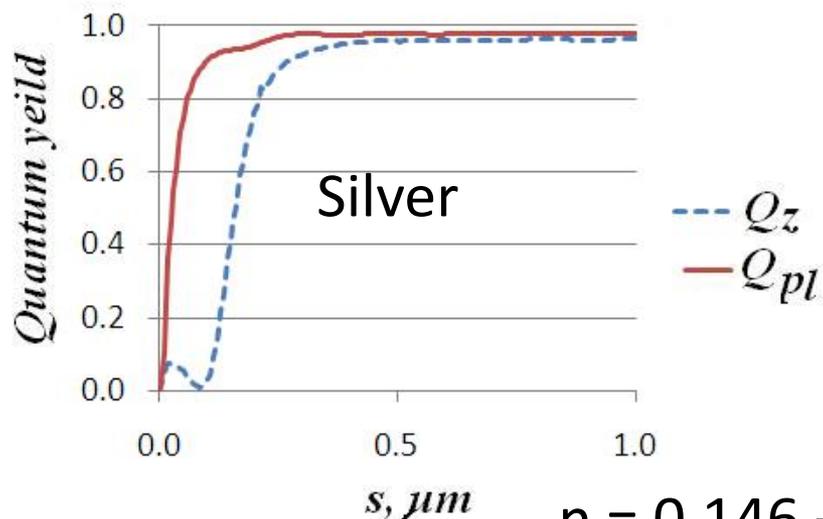
Спектр флуоресценции родамина 6G в ПММА

Модифицируются:

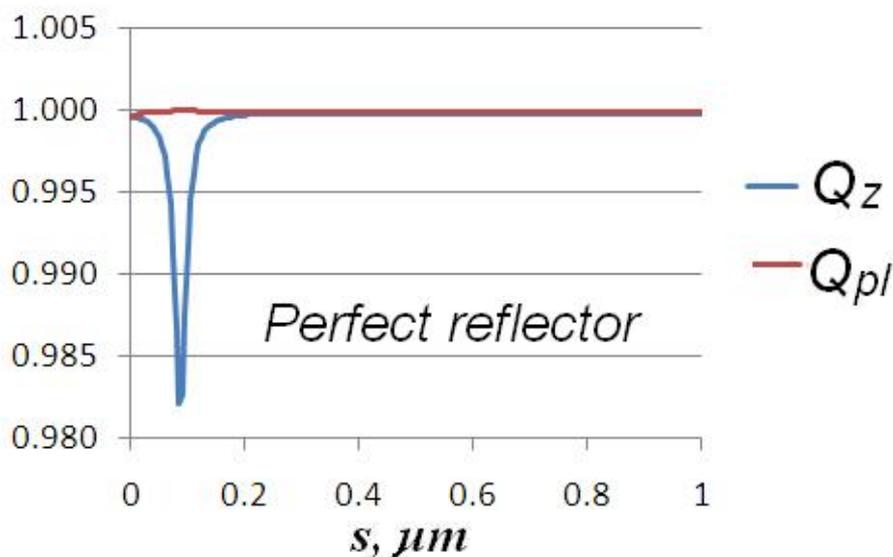
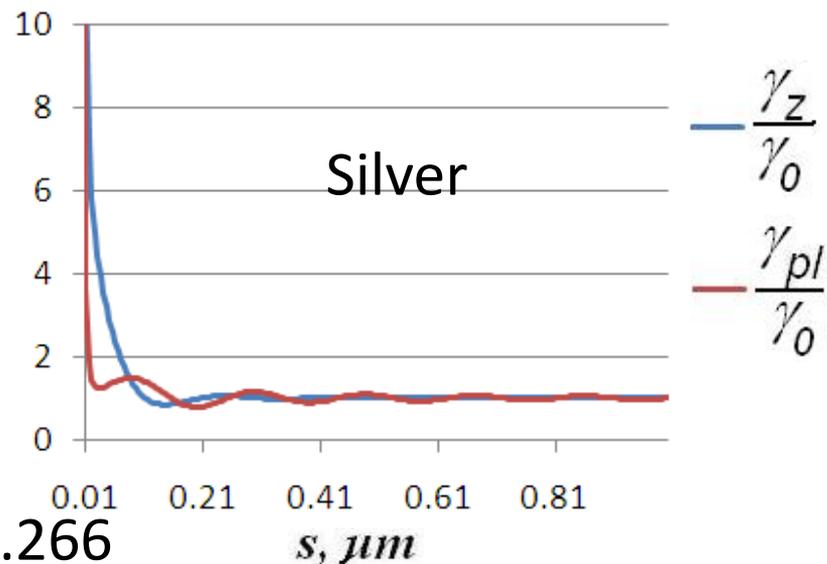
- $\gamma = 1/\tau$ - скорость испускания флуоресценции
- Q – квантовый выход флуоресценции
- Диаграмма направленности флуоресценции



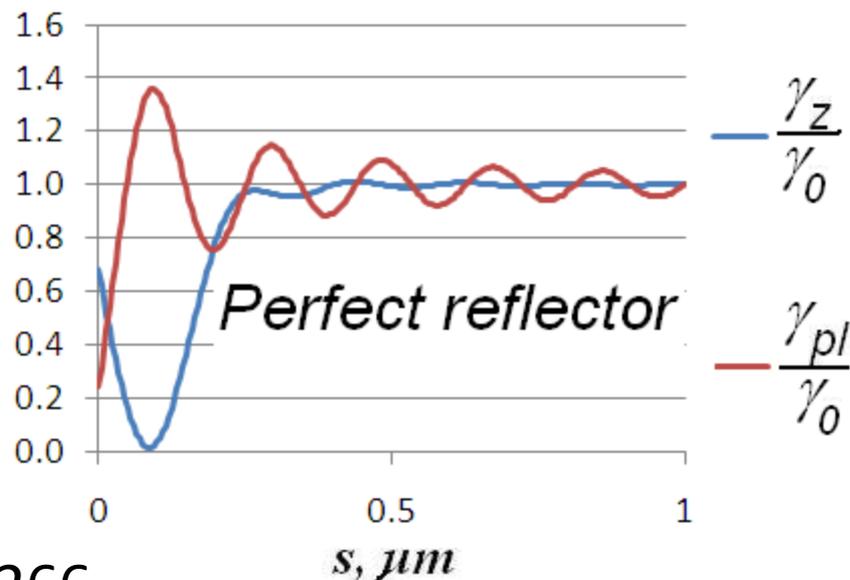
Флуоресценция ОМ около серебряной плёнки



$$n = 0.146 + i \cdot 3.266$$



$$n = 0 + i \cdot 3.266$$

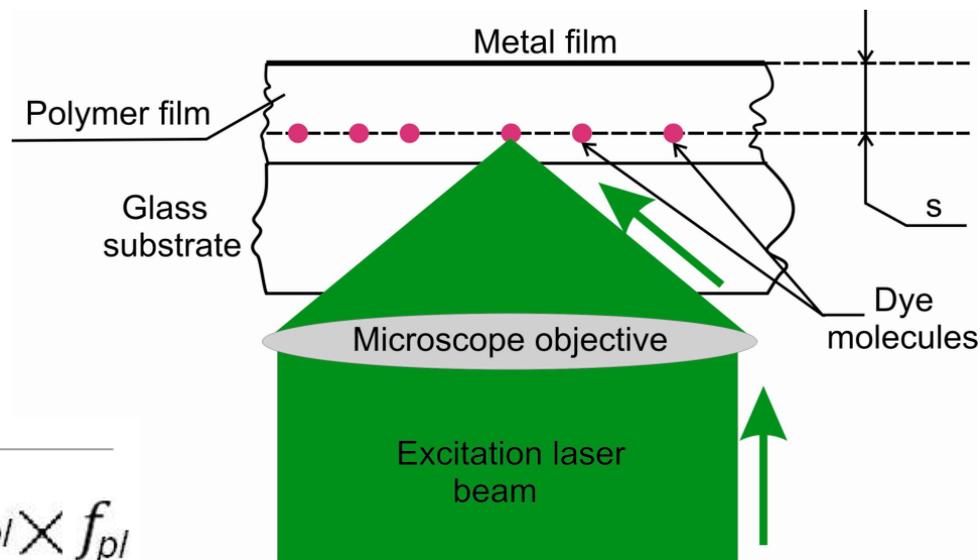
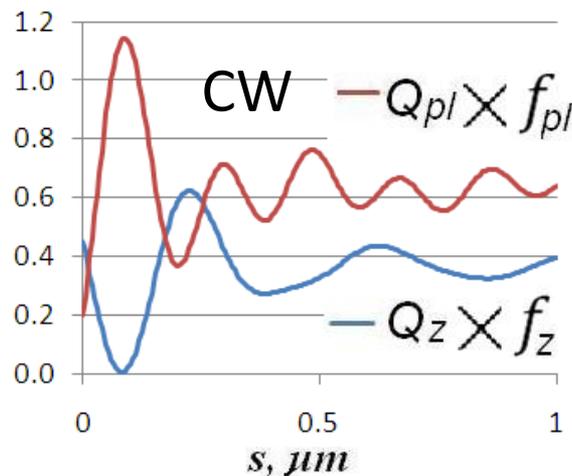
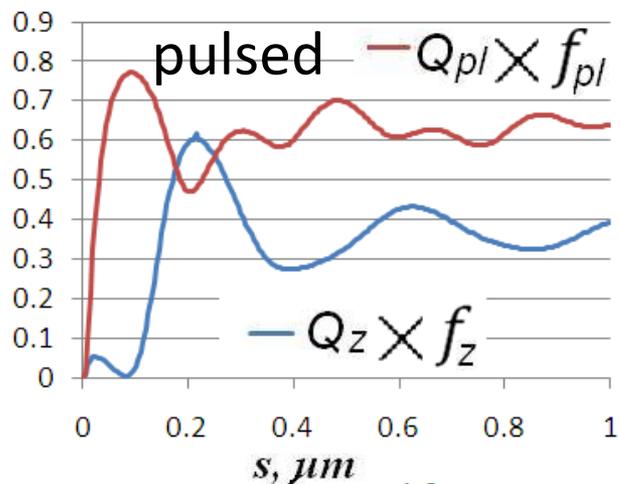


Построение ЛКСФМ изображений ОМ

$$I(\mathbf{r}, \mathbf{d}) = \boxed{Q(\theta_d) \times f(\theta_d)} \times |\mathbf{E}(\mathbf{r}) \mathbf{d}|^2 \quad \eta(\Omega_0, \mathbf{d}) = \frac{P_{emit}(\Omega_0, \mathbf{d})}{P_{emit}(4\pi, \mathbf{d})}$$

Импульсное возбуждение: $f(\Omega_0, \mathbf{d}) = \eta(\Omega_0, \mathbf{d})$

Непрерывное возбуждение: $f(\Omega_0, \mathbf{d}) = \eta(\Omega_0, \mathbf{d}) \times \gamma(\mathbf{d})$



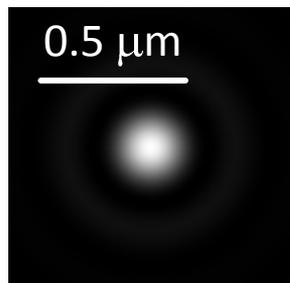
Параметр эффективности визуализации ОМ в зависимости от расстояния между молекулой и слоем серебра

Слой серебра толщиной
свыше 30 нм

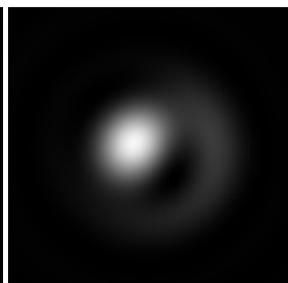
$s, \text{ nm}$	ε_p	ε_{CW}
10	55%	93%
30-100	0	0
150	95%	94%
300	72%	69%
400	94%	94%
500	93%	92%

Слой серебра толщиной
10 нм

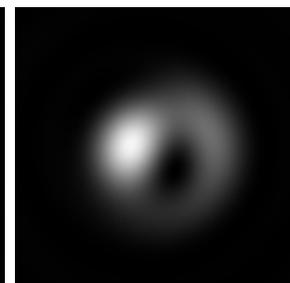
$s, \text{ nm}$	ε_p	ε_{CW}
10	38%	39%
50	43%	63%
100	94%	96%
300	58%	55%
400	97%	95%
500	95%	95%



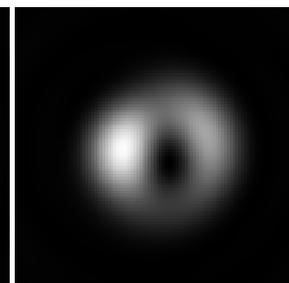
z-oriented



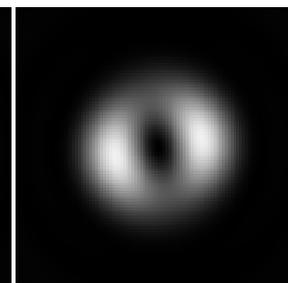
$\theta_d = 30^\circ$



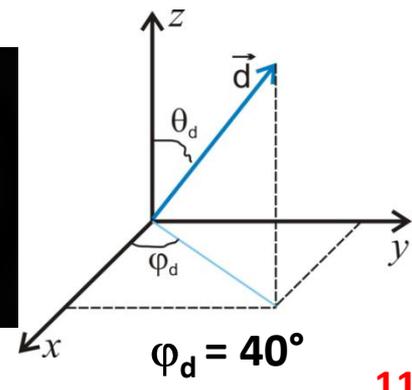
$\theta_d = 45^\circ$



$\theta_d = 60^\circ$



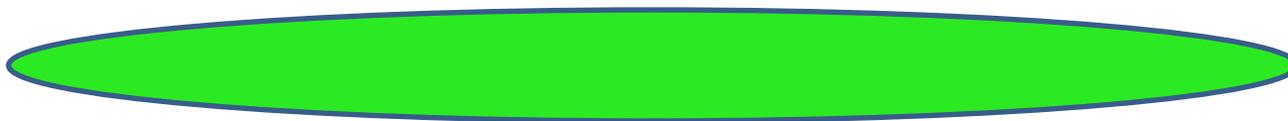
In-xy-plane



Заключение

Эффективная визуализация произвольно ориентированных одиночных молекул вблизи поверхности металла в рассмотренном случае возможна при определённых значениях расстояния между молекулой и слоем металла. При некоторых значениях расстояния флуоресцентное наблюдение z-ориентированных молекул невозможно.

Задача визуализации ПООМ при произвольных значениях расстояния может быть решена за счёт возможности изменения расстояния в эксперименте.



Благодарю за внимание!

