



УСИЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВБЛИЗИ ЗОЛОТОЙ ОПТИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ

Мехди Зохраби

Институт физики, Казанский Федеральный Университет, ул. Кремлевская, 18, Казань, Россия

Аннотация. Разработана золотая оптическая антенна. Уравнения Максвелла были решались с использованием метода конечных разностей во временной области (метод FDTD). Смоделировано напряжение электрического поля вблизи с острием в двух ситуациях — при непосредственном его освещении и при решеточном выводе поверхностного плазмона. Моделируется изменение электрического поля возбуждения лазера с длиной волны 400 - 700 нм вокруг оптической антенны. Возбуждение и конверсия плазмона в локализованный плазмон происходит на кончике острия. В этом случае локализация электрического поля рядом с острием нарастает, а величина горячей точки рядом с кончиком понижается. В локальной оптической микроскопии ближнего поля (TENOM), практическим применением этой модели являются подавление сигнала заднего плана и усиление разрешения.

Ключевые слова: усиление поля, поверхностный плазмон, золотой наконечник, локализованный плазмон, локализация света, горячая точка, моделирование методом FDTD.

1. Введение. Оптическая спектроскопия уникальным образом обеспечивает неразрушающую интраскопию и характеризацию материалов и получила широкое применение в исследованиях колебательных и электронных свойств наноструктур. Информация, которую можно извлечь, в конечном счете, зависит от чувствительной способности и разрешения оптических систем. Стандартные оптические методы, однако, ограничиваются дифракцией, которая значительно расширяет размерность пространства изображения образцов нанодиапозона. Общая цель ближнепольной оптической микроскопии состоит в расширении пространственного разрешения до величины, выходящей за рамки дифракционного предела [1,2]. Обычно, чтобы расширить спектр зондируемых пространственных частот, в ближнепольной оптической спектроскопии используются зонды, расположенные близко к образцу, который может нести исчезающие волны. Введение апертурных зондов [3] позволило формировать оптические изображения с разрешением ниже дифракционного и вызвало интерес во многих дисциплинах, в особенности, в материаловедении и биологических науках [4]. В качестве альтернативы, Весселем [5] было предложено использование металлических игл с лазерным освещением для ближнепольного формирования изображений, что стало предметом дискуссии нескольких исследовательских групп [6–12]. Сильные электрические поля, локализованные окрестностью металлической иглы увеличивают, как скорость возбуждения, так и интенсивность излучения, обеспечивая формирование изображения с высоким пространственным разрешением, а также колоссальное усиление сигнала. Универсальность этих методик позволяет изучать самые разные спектроскопические сигналы поверхностей, включая композиционное рассеяние и флуоресценцию в нанодиапозоне.

Оптические антенны усиливают локальные взаимодействия света и вещества и повышают чувствительную способность оптического обнаружения и считывания [13–18]. На-



пример, антенная оптическая микроскопия, такая как локальная ближнепольная оптическая микроскопия (tip-enhanced near-field optical microscopy, TENOM), используется для улучшения чувствительности и пространственного разрешения одномолекулярных флуоресцентных измерений [16,19-23]. Эти методы были недавно применены для формирования изображений ДНК с высоким разрешением [19-24], локализованных выведений в углеродных нанотрубках [25] и одноканальных белков в биологических мембранах [26].

Серьезным вызовом в антенной микроскопии стало то, что внешнее лазерное поле, используемое для возбуждения антенны, также непосредственно облучает образец. Это непосредственное облучение образца ведет к образованию фонового сигнала и ограничивает отношение «сигнал-помеха» измерения. Что касается образцов с высокой пространственностью и образцов с сильными колебаниями напряженности, такими как биологические системы, слабый ближнепольный сигнал полностью исчезает на фоне и больше не может быть измерен. Выдвигались различные подходы с целью ограничения этой проблемы, например, возбуждение через ограниченные апертуры [16-19] или консультной модуляции расстояние между зондом и образцом [27].

Поверхностные плазмонно-поляритонные волны распространяются в направлении кончика острия. В результате этой эффективной передачи пространственного возбуждения уменьшается размер участка возбуждения. Значительное пространственное разнесение дальнепольного возбуждения от кончика и вытекающее из этого подавление фоновых сигналов делают этот новый локальный источник оптического излучения весьма многообещающим кандидатом на применение в ближнепольной оптической микроскопии и спектроскопии.

2. Результаты и их обсуждение. Подход на основе метода конечных разностей по времени представляет собой надежный метод решения уравнений Максвелла в комплексной геометрии [28]. Этот метод обеспечивает информацию о временной области, предлагая проникнуть в суть электродинамики системы [29]. В методе конечных разностей во временной области электромагнитное поле и интересующие нас конструкционные материалы описываются на дискретной сетке, состоящей из так называемых «ячеек Йи» (Yee cells).

Все рассчитанные и изложенные значения напряженности нормализуются с учетом напряженности падающего света. При боковом освещении свет линейно поляризуется вдоль оси острия. Была использована программа "LUMERICAL", обоснованная на методе конечных разностей во временной области. Метод конечных разностей во временной области быстро стал одним из важнейших вычислительных методов в исследовании электромагнетизма с того времени, как Йи предложил его в 1966 г. [18]. В этом подходе пространство и время делятся на дискретные сегменты. Пространство сегментируется на коробчатые ячейки с электрическими полями, расположенными на краях этих коробочек, и магнитными полями, расположенными на гранях. Каждый компонент окружен четырьмя другими компонентами, и каждый H-компонент окружен четырьмя E-компонентами. Такая ориентация полей известна как «ячейка Йи», которая лежит в основе всякого FDTD-моделирования. Время квантуется на небольшие шаги, каждый из которых отображает время, необходимое полю для перехода от



одной ячейки к другой. Метод конечных разностей во временной области включает дискретизацию уравнений Максвелла, как во временной, так и пространственной области, чтобы можно было определить поля E и H в разных положениях на различных временных шагах. Метод конечных разностей во временной области может быть легко использован для моделирования рассеяния электромагнитных волн и излучения целей сложной формы, а также неравномерных диэлектрических объектов путем простой установки числа, размера и свойств материала для ячейки \tilde{Y} [19].

Была построена ближнеполюсная локальная модель, включая конус. Трехмерная прямоугольная сетка моделирования размером $10 \times 10 \times 5$ нм³ была равномерно применена в неотражающих граничных условиях идеально согласованного слоя (PML). Точка падения лазерного луча установлена на острие. Лазерный луч рассматривается как плоская волна длиной в 400-700 нм. Только компонент электрического поля отбирается для оценки усиления. Интенсивность света представлена площадью напряженности электрического поля, которая обладает той же тенденцией, что интенсивность света.

Усиление поля рядом с металлическими структурами нанодиапозона играет центральную роль в таких оптических явлениях, как поверхностно усиленное рамановское рассеяние (surface-enhanced Raman scattering, SERS), генерация второй гармоники (second-harmonic, SH) и ближнеполюсная микроскопия. Усиление происходит благодаря комбинации (интеграции) эффекта электростатического стержневого молниеотвода в связи с геометрическими особенностями заостренных структур и локализованного поверхностного плазмонного резонанса, которые зависят от длины волны возбуждения. Падающий свет приводит свободные электроны в металле в движение в направлении поляризации. Пока плотность электрического заряда в металле равна нулю в каждый момент, заряды накапливаются на поверхности металла. Когда поляризация падения становится перпендикулярной оси острия, диаметрально противоположные точки на поверхности острия имеют противоположные заряды. В итоге, наиболее отдаленный конец острия остается незаряженным, и никакого усиления поля не происходит. С другой стороны, когда поляризация падения параллельна оси острия, плотность вынужденного поверхностного заряда (the induced surface charge density) становится почти осесимметричной и обладает наивысшей амплитудой на конце острия [17, 18, 19]. Усиленное поле локализуется (ограничивается) кончиком острия во всех трех измерениях. Таким образом, освещенное острие представляет источник света в нанодиапозоне. Чтобы установить значительное усиление поля на острие, электрическое поле возбуждающего лазерного луча нужно поляризовать по оси острия. Влияние формы острия и материала на усиление поля было рассмотрено в целой серии публикаций с целью найти оптимальный вариант острия [20, 21]. В этой работе мы рассмотрели влияние формы острия на усиление поля. Мы предположили, что золотое острие должно иметь радиус кончика 10 нм и угол конусности 30°, а также цену деления дифракционной решетки 300 нм. Мы также использовали непрерывный лазер с длиной волны в интервале от 400 до 700 нм и проводили моделирование в двух разных ситуациях.

Во-первых, мы рассмотрели электрическое поле вокруг простого золотого зонда радиусом 10 нм и углом в 30°.

Мы рассмотрели кончик острия прямого освещения без дифракционной решетки и

прямого освещения дифракционной решетки. На рис. 1 показано электрическое поле вокруг острия с кончиком без дифракционной решетки и соответственно экспоненциальное затухание напряженности электрического поля по направлению оси z . На этом графике мы показали наивысшее увеличение вокруг острия зонда, и по мере увеличения расстояния от острия зонда напряженность поля падает, а на графике (2) показано это экспоненциальное падение по мере увеличения вертикального расстояния от острия z .

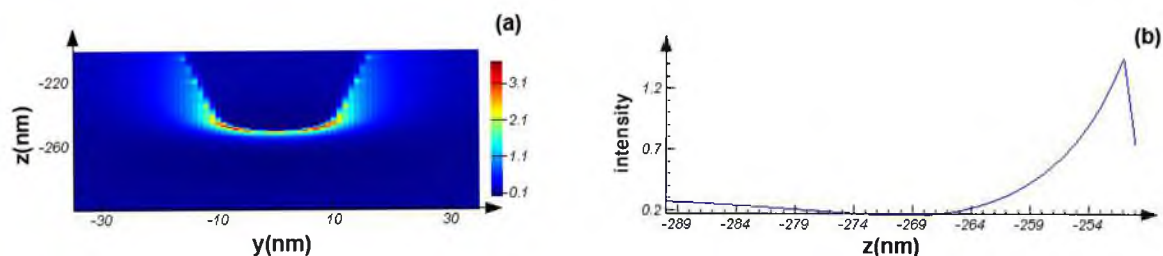


Рис. 1. (а) Усиление электрического поля рядом с золотым острием в плоскости y - z ; (б) экспоненциальное затухание напряженности электрического поля по оси z .

На следующем рисунке показано распределение усиливающегося поля в плоскости y - z . По мере увеличения расстояния от острия, повторного увеличения происходить не будет.

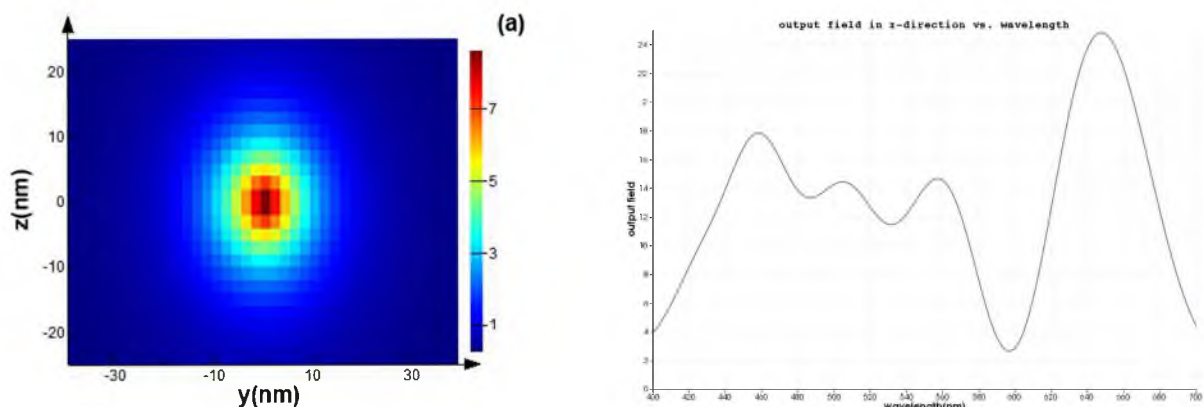


Рис. 2. (а) Усиление напряженности электрического поля в плоскости z - x , (б) по оси z для другой длины волны.

Как показано на рис. 3, напряженность электрического поля увеличивается. Причина состоит в возбуждении плазмона. В следующей ситуации мы разработали золотое острие с дифракционной решеткой, установленной на валу. Цена деления дифракционной решетки составляет 300 нм. В этом случае лазерное излучение освещает дифракционную решетку на валу острия. В этой ситуации мы смоделировали электрическое поле рядом с кончиком. Как показано на рис. 5, различные максимальные показатели связаны с возбуждениями поверхностного плазмона дифракционной решетки на валу.



В первую очередь, мы можем возбуждать поверхностный плазмон. Поверхностный плазмон перемещается к кончику и преобразуется на кончике в локализованный плазмон, так что могут быть отражены некоторые поверхностные плазмоны. Мы ожидаем, что в этой ситуации величина горячей точки рядом с кончиком будет уменьшаться. Возбуждение поверхностных плазмонов показано на рис. 4.

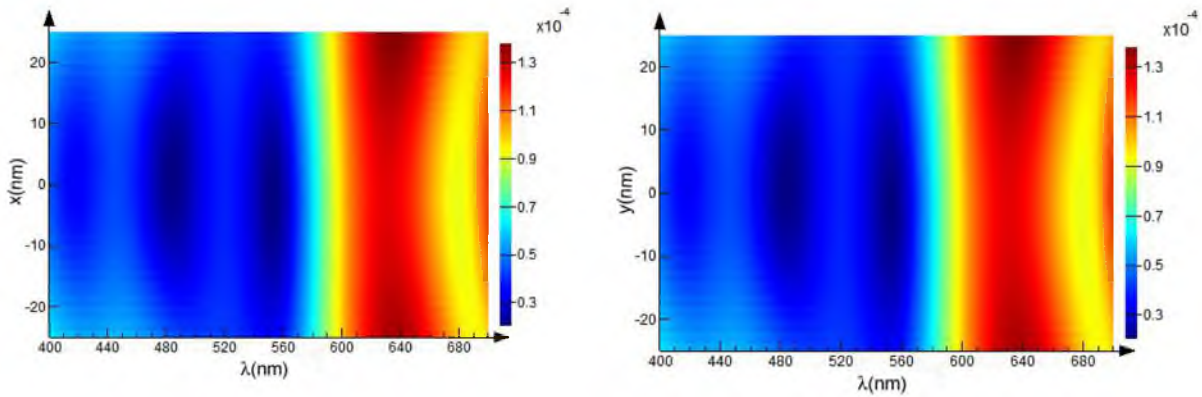


Рис. 3. Усиление электрического поля по оси x,y по отношению к длине волны.

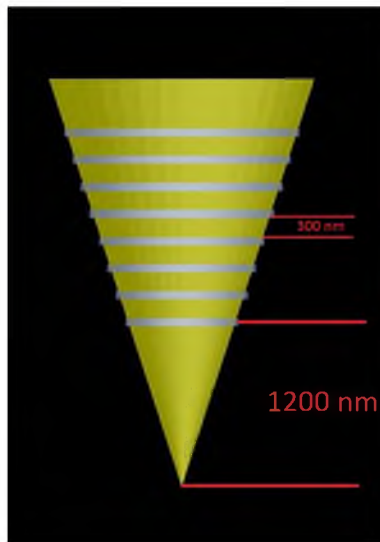


Рис. 4. Оптическая антенна.

На рис. 5 приведена зависимость длины волны от напряженности электрического поля на острие. В этом случае длина резонансной волны будет изменена из-за изменения цены деления дифракционной решетки. показано усиление электрического поля по отношению ко времени на направлении x и направлении y. На рис. 6 представлен график увеличения поля в плоскости x-y. В этом случае увеличение происходит на расстоянии, более близком к острию зонда, и может вызвать еще большую локализацию света в области ближе к кончику острия. Как показано на рис. 7, максимальное усиление электрического поля в плоскости x-y происходит при величине в $10 \cdot 10 \text{ nm}^2$. Одним

из путей применения этого подхода является увеличение разрешения в локально усиленной ближнеполевой оптической микроскопии и уменьшение сигнала заднего фона.

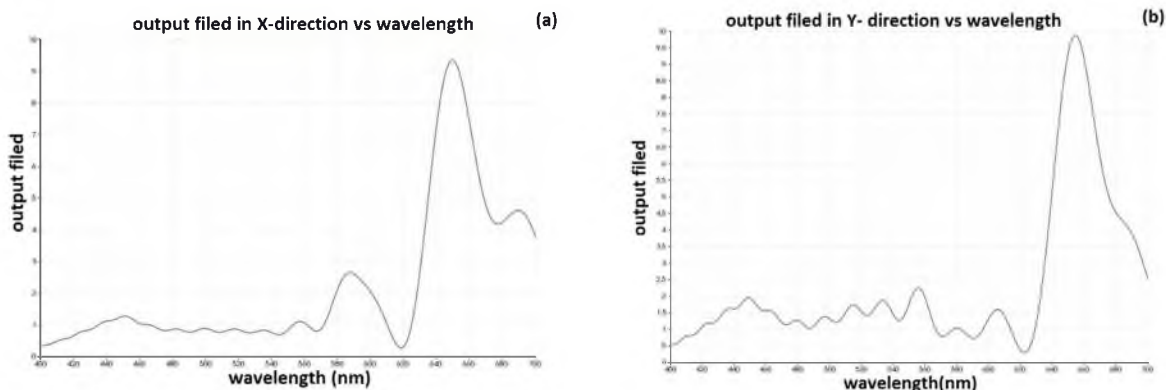


Рис. 5. Электрическое поле по отношению к длине волны (λ): (а) компоненте x электрического поля на кончике; (б) компоненте y электрического поля на кончике.

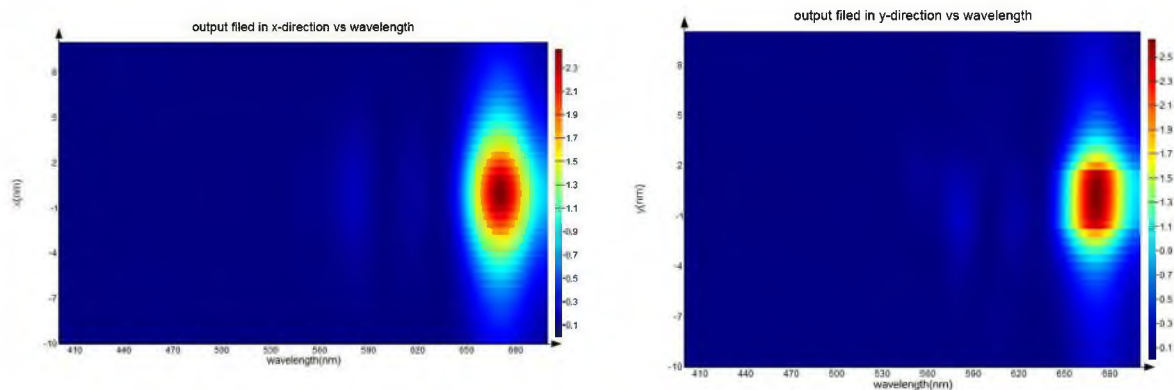


Рис. 6. Усиление электрического поля (λ): (а) – в направлении y ; (б) – в направлении x .

3. Заключение. В заключение, чтобы снизить воздействие непосредственного освещения кончика в локально усиленной ближнеполевой оптической микроскопии, можно сочетать падающее излучение на рассеивающийся поверхностный плазмон с его конверсией в локализованный плазмон на кончике острия и уменьшить локализацию света на кончике острия. В результате, в ближнеполевой оптической микроскопии будет увеличено разрешение, а сигнал заднего фона будет уменьшен.

Чтобы вычислить улучшение интенсивности электрического поля в близости – полевая область, в работе применен алгоритм FDTD. Таким образом, об улучшении почти области система исследования Apertureless свидетельствовали. У предложенного золотого наконечника оптическая антенна есть специальная геометрия.

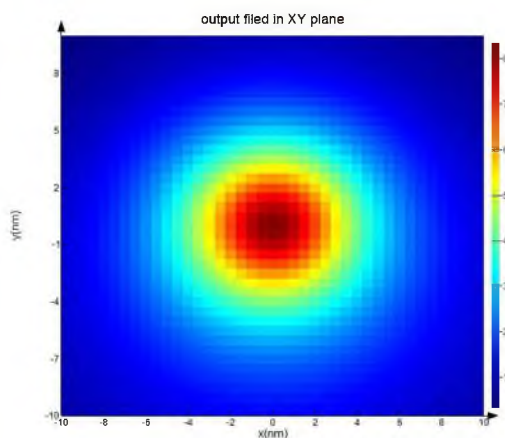


Рис. 7. Усиление электрического поля в плоскости x - y при $z=0$.

Литература

1. D.W. Pohl, W. Denk, and M. Lanz. Optical stethoscopy: Image recording with resolution $\lambda/20$. *Appl. Phys. Lett.*, 44:651–653, 1984.
2. A. Lewis, M. Isaacson, A. Harootunian, and A. Muray. Development of a 500Å resolution light microscope. *Ultramicroscopy*, 13:227–231, 1984.
3. E. Betzig and J. K. Trautman. Near-field optics: Microscopy, spectroscopy, and surface modification beyond the diffraction limit. *Science*, 257:189–195, 1992.
4. R.C. Dunn. Near-field scanning optical microscopy. *Chem. Rev.*, 99:2891–2928, 1999.
5. J. Wessel. Surface-enhanced optical microscopy. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2:1538, 1985.
6. B. Knoll and F. Keilmann. Near-field probing of vibrational absorption for chemical microscopy. *Nature*, 399:134, 1999.
7. E.J. Sánchez, L. Novotny, and X.S. Xie. Near-field fluorescence microscopy based on two-photon excitation with metal tips. *Phys. Rev. Lett.*, 82:4014, 1999.
8. S.M. Stöckle, Y.D. Suh, V. Deckert, and R. Zenobi. Nanoscale chemical analysis by tip-enhanced raman spectroscopy. *Chem. Phys. Lett.*, 318:131, 2000.
9. N. Hayazawa, Y. Inouye, Z. Sekkat, and S. Kawata. Near-field raman scattering enhanced by a metallized tip. *Chem. Phys. Lett.*, 335:369, 2001.
10. A. Hartschuh, E.J. Sánchez, X.S. Xie, and L. Novotny. High-resolution near-field raman microscopy of single-walled carbon nanotubes. *Phys. Rev. Lett.*, 90:095503–095506, 2003.
11. A. Hartschuh, M.R. Beversluis, A. Bouhelier and L. Novotny. Tip-enhanced optical spectroscopy. *Philosophical Transactions: Mathematical, physical and engineering science*, pages 807–819, 2004.
12. Kawata S. and Shalaev V.M., editor. Tip enhancement. *Advances in Nano-Optics and Nano-Photonics*. Elsevier, Amsterdam, 2007.
13. Crozier K.B., Sundaramurthy A., Kino G.S., Quate C.F. *J. Appl Phys.* 2003;94:4632–4642.
14. Mühlischlegel P., Eisler H.J., Martin O.J.F., Hecht B., Pohl D.W. *Science*. 2005; 308:1607. [PubMed]
15. Schuck P., Fromm D.P., Sundaramurthy A., Kino G.S., Moerner W.E. *Phys Rev Lett.* 2005; 94:017402. [PubMed]
16. Taminiau T.H., et al. *Nano Lett.* 2007;7:28. [PubMed]
17. Ghenuche P., Cherukulappurath S, Taminiau TH, van Hulst NF, Quidant R. *Phys Rev Lett.* 2008;101:116805.[PubMed]
18. Novotny L. *Nature*. 2008;455:879. [PubMed]
19. Frey H.G., Witt S., Felderer K., Guckenberger R. *Phys Rev Lett.* 2004;93:200801. [PubMed]



20. Gerton J.M., Wade L.A., Lessard G.A, Ma Z., Quake S.R. Phys Rev Lett. 2004; 93: 180801. [PubMed]
21. Anger P., Bharadwaj P., Novotny L. Phys Rev Lett. 2006;96:113002. [PubMed]
22. Bharadwaj P., Novotny L. Opt. Expr. 2007;15:14266–14274. [PubMed]
23. Ma Z., Gerton J.M., Wade L.A., Quake S.R. Phys Rev Lett. 2006;97:260801. [PubMed]
24. Anderson N., Bouhelier A., Hartschuh A., Novotny L.J. Opt. A: Pure Appl Opt. 2006; 8: S227–S233.
25. Hoepfner C., Novotny L. Nano Lett. 2008;8:642–646. [PubMed]
26. Mangum B.D., Mu C., Gerton J.M. Opt. Expr. 2008;16:6183–6193. [PubMed]
27. A. Taflove and S.C. Hagness, in Computational Electrodynamics: the Finite - Difference Time – Domain Method (Artech House, 2000).
28. B.C. Galarreta, I. Rugar, A. Young, and F. Lagugn'e-Labarthe, "Mapping hot-spots in hexagonal arrays of metallic nanotriangles with azobenzene polymer thin films", J. Phys. Chem. C 115(31), 15318–15323 (2011).

STRENGTHENING OF ELECTRIC FIELD NEAR GOLD OPTIC ANTENNA

Mekhdi Zokhrabi

Institute of Physics, Kazan Federal University, Kremlevskaya St., 18, Kazan, Russia

Abstract. Gold optic antenna is developed. Maxwell's equations have been solved by means of finite difference method along time axe (FDTD-method). It has been modeled the electric field stress near tip at two cases: at its straight illumination and at lattice withdrawal of surface plazmon. It is model the variation of electric field of laser disturbance with the wavelength 400 - 700nm round the optic antenna.

Key words: strengthening of field, surface plazmon, gold tip, localized plazmon, localization of light, hot point, FDTD-method.