

УДК 681.132.65

ОПЫТЫ ПО КОНЦЕНТРАЦИИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В РАЗМЕРАХ, СУЩЕСТВЕННО МЕНЬШИХ ДЛИНЫ ВОЛНЫ

В. С. Зуев¹, А. В. Францессон²

Получена концентрация электромагнитной волны на площадке размером $d \ll \lambda$ ($d \sim 1$ нм) в биконусе металлическая игла-плоскость. Возбуждались сходящаяся и отраженная волны при $r < 10$ нм от плоскости на СВЧ и оптических частотах. Спектроскопия молекулы с биконусом в ее ближнем поле чувствительнее в $(\lambda/r)^4 = 10^{12}$ раз ($\lambda = 1$ мкм, $r = 1$ нм). Биконус является измерителем и инструментом, работающая сразу на нескольких λ . Обсуждены другие эксперименты с точки зрения волн в биконусе. Указано на возможность продвижения в жесткий УФ и мягкий рентген.

Основной целью данной работы является экспериментальная проверка выводов теоретических исследований о возможности концентрации электромагнитной волны на площадке, размеры которой много меньше длины волны, с помощью двухсвязных сужающихся волноводов. В многочисленных работах в области сканирующей оптической микроскопии ближнего поля в качестве основного рабочего элемента, ограничивающего (но не концентрирующего) электромагнитное поле, применялся диэлектрический световод с заостренным концом, покрытый металлом. Открытый тонкий конец такого световода имеет размеры порядка нанометра и меньше. В результате достигнуто пространственное разрешение порядка единиц нанометра, что на несколько порядков

¹Поскольку автор категорически отказался обсуждать для согласования с ним предложенную редакционную правку, статья публикуется в виде, представленном авторами.

²Институт Радиотехники и электроники РАН. 141120 Фрязино, МО.

меньше теоретического предела разрешения обычных микроскопов (мы будем называть их микроскопами дальнего поля – происхождение терминологии становится ясным, если обратиться к элементарному диполю, в поле которого имеются ближняя, квазистатическая и дальняя волновая зоны).

В сужающемся конце обычного односвязного световода, когда его поперечное сечение становится меньше длины волны излучения, наблюдается сильное (экспоненциальное) затухание волны. Даже при сравнительно больших углах сужения световода затухание составляет 60 ДБ. Это объясняется тем, что в односвязных волноводах все типы волн имеют критическую частоту, ниже которой волна из распространяющейся превращается в затухающую даже при бесконечно большой проводимости стенок световода.

Ранее нами было предложено вместо односвязного волновода с переменным поперечным сечением применить двусвязный волновод – биконический рупор, подобный коаксиальной или двухпроводной линиям [1], которые не имеют низкочастотной отсечки по частоте. Коаксиальный сужающийся волновод с идеально проводящими стенками может концентрировать электромагнитные волны без уменьшения мощности на площадки, размеры которых могут быть сколь угодно малы.

Ограничением возможностей поперечного сжатия волны является конечная проводимость материала стенок волновода. В работе [2] теоретически исследовано распространение сходящихся и расходящихся главных волн в биконическом рупоре с учетом конечной проводимости материала стенок. Показано, что при достаточно больших углах между образующими поверхностями стенок рупора и его осью и применении хорошо проводящих металлов существенное затухание главных волн как на сверхвысоких, так и на оптических частотах происходит только на расстоянии порядка и меньше нанометра от его геометрической вершины.

Для проверки возможности концентрации электромагнитной волны без существенных потерь энергии на площадках с субволновыми размерами была применена коническая металлическая игла в сочетании с металлической плоскостью. Такое устройство также является биконическим рупором [2]. Основные элементы экспериментальной установки показаны на рис. 1. Возбуждалась сходящаяся главная волна, регистрировалась отраженная главная волна, которая возникала и резко изменялась при приближении вершины конической иглы к плоскости на расстояние порядка нескольких нанометров и меньше. Иглы изготавливались методом электрохимического травления по технологии, аналогичной технологии изготовления игл для электронной туннельной микроскопии [3]. Авторы признательны К. Н. Ельцову и В. Ю. Юрову, которые

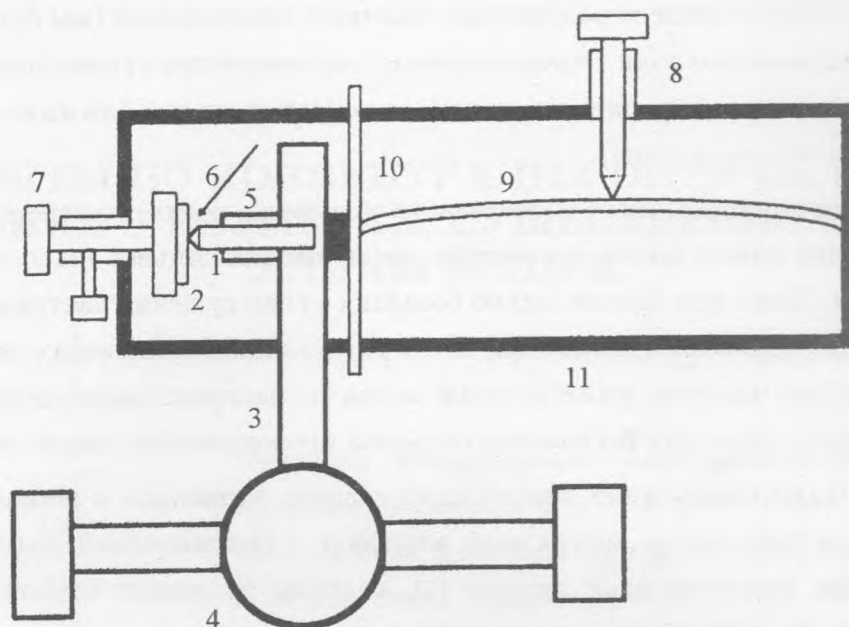


Рис. 1. Экспериментальное устройство: 1 – туннельная игла, 2 – металлическая плоскость на поверхности пьезокристалла, 3 – волновод, 4 – направленный волноводный ответвитель, 5 – коаксиальная линия, 6 – лазерный пучок, 7, 8 – микрометрические винты, 9, 10 – редуциатор перемещений микрометрического винта 8 из 2-х упругих пластин 9 и 10, 11 – корпус.

на раннем этапе работы снабдили их отличными иглами из вольфрама. Волновое сопротивление такого рупора на больших расстояниях от вершины (на расстояниях, при которых конечная проводимость стенок рупора не вызывает существенного затухания волны) равно 50 и 75 Ом при углах между образующей конической иглы и ее осью, равных соответственно 47 и 32 градусам.

Экспериментальная установка содержала трехступенчатое устройство перемещения конической иглы относительно проводящей плоскости в направлении оси иглы. В первой ступени грубого перемещения применялся микрометрический винт. Вторая ступень перемещения вводилась в действие после фиксации первой ступени и осуществлялась распрямлением изогнутой напряженной плоской пластины под воздействием второго микрометрического винта. Диапазон перемещения второй ступени составляет 10 мкм при минимальном коэффициенте уменьшения относительно перемещения конца второго микрометрического винта порядка 100. Процесс приближения тонкого конца иглы к проводящей плоскости контролировалось инструментальным микроскопом, причем наблюдалось приближение конца иглы к ее изображению в плоскости. Третья ступень

перемещения осуществлялась пьезокерамическим элементом. Диапазон перемещения третьей ступени 1,6 мкм. Контроль перемещения третьей ступени в процессе приближения иглы к металлической пластине производился по туннельному току между иглой и пластиной при постоянном напряжении на игле около 1 В. Перемещение измерялось по напряжению на пьезокерамическом элементе с началом отсчета от положения касания иглы и пластины.

Для возбуждения главной волны в биконическом рупоре в СВЧ диапазоне применялся обычный волноводно-коаксиальный переход, связывающий волну H_{01} в прямоугольном волноводе с короткой коаксиальной линией, образованной узкой металлической трубкой и центральной проволокой (иглой), один конец которой (тупой) выдвинут через отверстие в волновод, а другой, конический конец выдвинут из трубки на расстояние, приблизительно равное ее радиусу. Конический конец проволоки образует с придвинутой к ее концу проводящей пластиной биконический рупор. Коаксиально-волноводный переход был настроен с помощью поглощающей согласованной нагрузки, одетой на его конец с коническим острием. При удалении поглощающей нагрузки со стороны фланца волновода наблюдалась отраженная волна как от разомкнутой линии. Возбуждение сходящейся волны на острие конуса регистрировалось наблюдением отраженной волны в прямоугольном волноводе, которая начинала изменяться, когда игла приближалась к плоскости на расстояние порядка нескольких десятков нанометров, и до касания. По мере приближения иглы к плоскости интенсивность отраженной волны сначала уменьшалась медленно, а затем, при расстоянии от вершины иглы до плоскости порядка 1 нм, наблюдался острый минимум с последующим ростом вплоть до касания. Для различных игл общий характер зависимости интенсивности отраженной волны от расстояния между концом иглы и плоскостью сохранялся. Существенные различия до 70% наблюдались, когда игла приближалась к плоскости на расстояние около 7 нм и менее. Это явление можно объяснить, по-видимому, различной формой заостренных концов, которую пока не удавалось надежно контролировать.

Здесь, а также и далее естественным образом возникает вопрос о точности изготовления конусов и о материале, который пригоден в данном случае. Мы полагаем, что поверхности конусов должны быть зеркально отражающими для излучения(ний) на рабочей(их) длине(длинах) волны(волн). В сечениях диаметром более длины волны форма должна строго выдерживаться, в сечениях диаметром меньше и много меньше длины волны, на расстояниях меньше длины волны от геометрической вершины биконуса (в зоне квазистационарных полей) требования к форме не так строги. Впрочем, в

СВЧ области известны ступенчатые переходы, напоминающие частично рассыпавшуюся колоду карт. Будут ли такие ступенчатые волноводы постепенно уменьшающегося сечения работать аналогично биконическому волноводу, можно определить только практически, так как их теоретическое исследование чрезвычайно трудоемко.

Для реальных металлов поверхностный ток мало отличается от поверхностного тока металла идеальной проводимости, коль скоро абсолютная величина показателя преломления велика по сравнению с единицей [5]. Такому условию удовлетворяют в значительной части видимого спектра золото *Au*, серебро *Ag*, медь *Cu* и алюминий *Al* [6]. Вольфрам имеет малую электропроводность и пригоден лишь в силу своей доступности (в первую очередь – в виде игл).

Нами установлено, что ковкость и вязкость *Au*, *Ag*, *Cu* и *Al* не препятствуют возможности изготовления острых игл из данных материалов. Как показывают опыты, *Al* мало пригоден, по-видимому, из-за окисной пленки, *Ag* и *Cu* окисляются на воздухе, но по непроверенным данным монокристаллический *Ag* живет на воздухе довольно долго.

Для возбуждения сходящейся главной волны в оптическом диапазоне вершина иглы, придвинутой к плоскости, освещалась сфокусированным излучением гелий-неонового лазера так, что направление поляризации излучения лежало в плоскости, содержащей ось иглы, а само излучение было направлено вдоль биссектрисы угла между образующей конической поверхности иглы и плоскостью. Отраженная расходящаяся волна была хорошо видна глазом. Яркая точка в вершине иглы возникала при приближении ее конца к плоскости на расстояние около нескольких десятков нм. Сначала интенсивность расходящейся волны плавно нарастает, затем, когда вершина иглы приближается к плоскости на расстояние от 3 до 7 нм, резко падает и снова растет вплоть до касания иглы и плоскости. На больших расстояниях от вершины эта волна распространяется независимо от волнующих стенок.

Для инструментального контроля расходящаяся волна фокусировалась линзой на фотодиод. Характер изменений фототока при расстояниях от 3 до 7 нм, как и в СВЧ диапазоне, оказался количественно различным для разных игл при сохранении общего качественного подобия. Количественные различия для разных игл в оптическом и СВЧ диапазонах совпадали.

Зависимость интенсивности расходящейся волны от угла наблюдения ϑ относительно оси иглы оказалась пропорциональной $\sin^{-2} \vartheta$, то есть подобной зависимости квадрата амплитуды электрического поля волны в биконическом рупоре от полярного угла ϑ . В каждой точке, отличающейся значением азимутального угла (то есть углом поворота

относительно оси иглы), расходящаяся волна линейно поляризована вдоль направления, перпендикулярного к поверхности конической иглы, то есть вдоль радиуса поперечного сечения биконуса. Это также соответствует теоретически найденной конфигурации главной волны.

Доказательством того, что нам удалось возбудить главную волну, что она распространяется к вершине рупора до расстояния от нее порядка нанометра без значительного затухания являются (1) сильная зависимость амплитуды расходящейся волны от расстояния между плоскостью и вершиной иглы именно в интервале расстояний порядка нм, (2) осевая симметрия расходящейся волны относительно оси иглы, (3) исчезновение расходящейся волны при повороте плоскости поляризации возбуждающего лазерного излучения на 90 градусов, (4) подобие угловой зависимости интенсивности расходящейся волны и волны в биконическом рупоре, (5) совпадение направления поляризации расходящейся волны и направления электрического вектора волны в биконическом рупоре.

В радиотехнических терминах наблюдаемые явления могут быть описаны следующим образом. При удалении иглы от поверхности происходит уменьшение сосредоточенной емкости, образованной вершиной иглы и плоскостью, в результате происходит деление наведенной ЭДС между увеличивающимся (при увеличении зазора) реактивным сопротивлением емкости и постоянным импедансом (волновое + омическое сопротивление) коаксиала и, как следствие, ослабление коаксиальной волны. Речь идет о расстояниях в нанометры от геометрической вершины конуса, поскольку явление наблюдается при расстояниях, когда через зазор течет туннельный ток. Эффект нельзя объяснить ни разностью потенциалов в падающем поле на отрезке вершина иглы – плоскость, ни явлением Брюстера, ни законами отражения геометрической оптики.

Таким образом, экспериментально подтверждены предсказания теории о концентрации электромагнитного излучения в биконическом рупоре почти без потерь на объекты порядка нанометра. Более подробные данные будут опубликованы в другой статье [4].

Подтверждением является также появившееся в литературе сообщение [7]. В работе [7] на основе представлений о природе (SERS) (Surface Enhanced Raman Scattering, по-русски – гигантское комбинационное рассеяние) и об электростатическом эффекте концентрации электрического поля на острие осуществлен следующий опыт. Игла, установленная вблизи металлической плоскости острием к ней на расстоянии, когда имеется туннельный ток (~ 10 нм), освещалась сфокусированным излучением импульсного лазера. В результате под серебряной иглой обнаружено образование выступов диаметром

и высотой около 10 нм, под вольфрамовой иглой – образование выемок таких же размеров. На основании наших представлений о биконическом волноводе можно утверждать, что произошло возбуждение сходящейся волны и концентрация электромагнитного поля на кончике иглы. В результате произошло разрушение материала в одном случае иглы, в другом – подложки. В обоих случаях подвергся разрушению материал меньшей термостойкости.

В опытах авторов работы [7] эффект концентрации электромагнитного поля был бы заметно больше, если бы излучение лазера было направлено на кончик иглы по направлению в пределах плоского угла, образуемого направляющими конических поверхностей, ближе к поверхности иглы.

В работе [7] обнаружено почти 10^6 -кратное увеличение интенсивности на кончике иглы по отношению к интенсивности падающего лазерного излучения. По оценкам авторов интенсивность на кончике иглы превышала $2 \cdot 10^7 \text{ Вт/см}^2$.

При применении устройств типа биконического рупора возникают новые возможности для исследований в области спектроскопии индивидуальных примесных центров и других микрообъектов (например, квантовых точек). Особый интерес представляет рассмотрение связи изолированной частицы с электродипольным квантовым переходом и узким концом усеченного биконического рупора, расположенным в ближней зоне диполя на расстоянии r_0 от него. Если диполь расположен в геометрической вершине рупора и ориентирован вдоль его оси, то эффективность излучения в биконический рупор увеличивается по сравнению со спонтанным излучением в свободное пространство в отношении $(\lambda/r_0)^4$, где r_0 – расстояние от диполя до входа рупора. Становится возможным наблюдение спектральных линий отдельных центров, сильно уширенных различными взаимодействиями, а не только линий с естественной (спонтанной) шириной, как это делается в настоящее время при обычной технике фокусировки. Квантовый переход индивидуального центра можно рассматривать как квазистационарный резонатор, связанный своим локальным полем через трансформатор импедансов с коаксиальной линией. Коэффициент связи резонатора с линией можно изменять перемещением центра относительно открытого среза узкого конца биконического рупора и установить такое положение, при котором связь будет критической (нагруженная добротность резонатора сравняется с собственной добротностью).

Таким образом, экспериментально подтверждены предсказания теории о концентрации электромагнитного излучения в биконическом рупоре почти без потерь на объекты порядка нанометра. Экспериментально показана принципиальная возможность со-

здания устройства, совмещающего функции датчика (электроматнитного микроскопа ближнего поля) и инструмента воздействия интенсивным электромагнитным полем с пространственным разрешением порядка нм в оптическом и СВЧ диапазонах.

Особый интерес представляет ответ на вопрос о возможности продвижения обсуждаемой методики за пределы видимого диапазона, а, именно, в жесткий ультрафиолет и мягкий рентген. Ответ на этот вопрос, по-видимому, можно считать положительным. Если оставаться в рамках макроскопических представлений о диэлектрических свойствах вещества, то имеются основания считать возможной концентрацию электромагнитного излучения с энергией квантов 10 и 100 eV .

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант N 96-02-18123 и частично грант N 96-15-96582.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Zuev V. S., Frantesson A. V. *Quantum Electronics*, **26**, 250 (1996);
Зуев В. С., Францессон А. В. *Квантовая электроника*, **23**, 257 (1996).
- [2] Зуев В. С., Францессон А. В. *Радиотехника и электроника* (в печати, 1998); Главная волна в биконическом рупоре при конечной проводимости материала стенок. Препринт ФИАН, N 44, Москва, 1996.
- [3] Dremov V. V., Makarenko V. A., Sharoval S. Y., Trofimov O. V., Beshenkov V. G., Khodov I. I. *Nanobiology*, **3**, 83 (1994).
- [4] Frantesson A. V., Zuev V. S. Subwave length squeezing of electromagnetic field. *J. Russian Laser Research* (submitted).
- [5] Grober R. D., Schoelkopf R. J., and Prober D. E. *Appl. Phys. Lett.*, **70**, 1354 (1997).
- [6] Palik E. D. *Handbook of Optical Constants of Solids*. Academic Press, New York, 1985.
- [7] Dickmann K., Jersch J., Demming F. *Surf. Interface Anal.*, **25**, 500 (1997), цитируется по тексту рукописи.

Поступила в редакцию 27 мая 1998 г.