

БЛИЖНЕПОЛЬНЫЕ ТЕРАГЕРЦОВЫЕ ЗОНДЫ НА ОСНОВЕ ЗАОСТРЕННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТЕРЖНЕЙ С ДИФРАКЦИОННЫМИ РЕШЕТКАМИ

М.А. Тинская, А.И. Денисюк

Предложена новая конструкция ближнепольных терагерцовых зондов на основе заостренных металлических стержней с дифракционными решетками. Применение дифракционной решетки позволяет повысить эффективность ближнепольного зонда. Эффект основан на конструктивной интерференции волны, дифрагированной на решетке, и волны, падающей на острие зонда. Представлены аналитические расчеты параметров конструкции терагерцового зонда с дифракционной решеткой, а также результаты численного моделирования электродинамики методом конечных разностей во временной области. Также экспериментально рассмотрена возможность создания подобных зондов с помощью метода электрохимического травления.

Ключевые слова: ближнепольная терагерцовая микроскопия, ближнепольные терагерцовые зонды, поверхностные электромагнитные волны.

Введение

Терагерцовая (ТГц) спектроскопия активно применяется для исследования полупроводниковых структур и биологических объектов. Примечательно, что, благодаря малой энергии фотонов, ТГц излучение не повреждает объекты, что особенно важно при исследовании биологических тканей *in vivo* [1–4]. Существенной проблемой ТГц технологий является большая длина волны излучения и, следовательно, ограничение разрешения получаемых изображений вследствие дифракционного предела. Из-за этого на ТГц частотах невозможно прямое исследование полупроводниковых наноструктур или малых биологических объектов.

Проблема преодоления дифракционного предела в ТГц области может быть решена с помощью ближнепольной микроскопии. При этом важной задачей является разработка зондов, способных концентрировать ТГц излучение в область с размерами много меньше длины волны. При создании данных зондов может использоваться явление прохождения электромагнитного (ЭМ) излучения через субволновую диафрагму [5] или явление усиления поля вблизи металлического острия, освещаемого ЭМ излучением [6–10]. Хотя, используя такие методы, можно достичь субволновой фокусировки ТГц излучения в ближней зоне, эффективность таких зондов мала. Это представляет некоторые трудности, учитывая, что современные ТГц источники обладают малой мощностью. В связи с этим в настоящее время проводится поиск альтернативных конструкций зондов, способных эффективно концентрировать ТГц излучение в субволновую область. Примерами таких конструкций являются гофрированные металлические стержни и сужающиеся коаксиальные структуры, описанные в теоретических работах [11, 12]. Однако подобные конструкции сложны в изготовлении, кроме того, они поддерживают распространение только ЭМ волн с радиальной симметрией. Эти особенности затрудняют практическое применение зондов данных конструкций.

Постановка задачи

В ближнепольных ТГц зондах на основе заостренных металлических стержней падающее ТГц излучение освещает не только острие зонда, но и достаточно большую область ($> \lambda$) вокруг. При этом с образцом взаимодействует и формирует полезный рассеянный сигнал лишь излучение, освещающее острие стержня, а остальное излучение формирует паразитное рассеяние. Таким образом, сложно выделить информацию о ближнепольных свойствах образца на фоне общего ТГц излучения, рассеянного зондом и образцом.

В работе рассмотрена возможность увеличения эффективности ТГц зонда при условии конструктивной интерференции волн, направленных на острие зонда и область вдали от него. Для достижения этого эффекта предлагается использовать дифракционную решетку, нанесенную на некотором расстоянии от острия. При определенных геометрических параметрах решетки падающая ТГц волна будет преобразовываться в поверхностную электромагнитную волну (ПЭВ), которая распространяется дальше по сужающемуся стержню и интерферирует с волной, падающей на острие. В работе проведен расчет и численное моделирование электродинамики ТГц ближнепольного зонда с дифракционной решеткой. Показано преимущество использования дифракционных решеток. Для упрощения расчеты и моделирование проведены для двумерного случая. Также предложен относительно простой метод создания ТГц зондов с решетками.

Расчеты

Рассмотрим падение плоской электромагнитной волны с р-поляризацией на металлический клин с дифракционной решеткой (рис. 1). При определенных углах падения дифрагированная волна будет направлена вдоль поверхности и будет представлять собой ПЭВ [13, 14].

Рассмотрим условие генерации ПЭВ ТГц диапазона. Волновой вектор ПЭВ определяется следующим соотношением:

$$\mathbf{k}_S = \mathbf{k}_T + m\mathbf{k}_G. \quad (1)$$

Первое слагаемое k_T – проекция волнового вектора падающей волны k_0 на поверхность:

$$k_T = k_0 \sin \theta, \quad k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (2)$$

где λ – длина волны излучения.

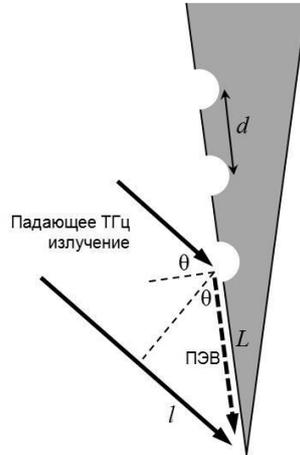


Рис. 1. Схематическая иллюстрация генерации и распространения ПЭВ по поверхности металлического клина с дифракционной решеткой

Во втором слагаемом m – порядок дифракции, а k_G – волновой вектор решетки:

$$k_G = \frac{2\pi}{d}, \quad (3)$$

где d – период решетки. Волновое число ПЭВ связано с волновым числом падающего излучения следующим соотношением:

$$k_S = k_0 \sqrt{\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}},$$

где ϵ_1 и ϵ_2 – относительные диэлектрические проницаемости материала клина (металл) и окружающего пространства (вакуум или воздух). Учитывая, что в ТГц диапазоне диэлектрическая проницаемость металлов является большой величиной, получаем:

$$k_S \approx k_0. \quad (4)$$

Таким образом, подставляя выражения (2) и (3) в (1) и учитывая условие (4), получаем, что для генерации ПЭВ ТГц диапазона период решетки и угол падения излучения должны быть связаны соотношением

$$d = \frac{m\lambda}{1 - \sin \theta}. \quad (5)$$

Теперь рассмотрим условие конструктивной интерференции ПЭВ, сгенерированной на решетке, и падающего ЭМ излучения, направленного на острие стержня. Условие конструктивной интерференции выполняется, когда оптическая разность хода волн составляет $n\lambda$, где n – целое число. Кроме того необходимо учитывать изменение фазы волны на $\lambda/2$ при генерации ПЭВ. Таким образом, оптическая разность хода составляет:

$$L - l = n\lambda + \frac{\lambda}{2}. \quad (6)$$

Кроме того, должно выполняться условие

$$\sin \theta = \frac{l}{L}. \quad (7)$$

Тогда из (6) и (7) получаем выражение для оптической длины хода волны по поверхности клина. Это же выражение определяет расстояние между острием клина дифракционной решеткой, которое должно сохраняться для обеспечения условия конструктивной интерференции:

$$L = \frac{n\lambda + \lambda/2}{1 - \sin \theta}.$$

Рассчитаем параметры решетки, если длина волны излучения составляет $\lambda = 300$ мкм, а угол падения 30° . Тогда из условия генерации ПЭВ (5) при $m=1$ получаем, что период решетки $d = 600$ мкм, а учитывая условие усиливающей интерференции (7) при $n=0$, получаем, что решетка должна отстоять от острия клина на расстояние $L = 300$ мкм.

Численное моделирование

Для подтверждения проведенных расчетов было выполнено численное моделирование электродинамики металлического клина с дифракционной решеткой при падении плоской ЭМ волны с р-поляризацией. Моделирование выполнено с помощью метода конечных разностей во временной области в программе EM Explorer. Геометрические параметры структуры и параметры падающей волны взяты из предыдущего раздела. Радиус скругления острия клина составил 15 мкм. Дифракционная решетка состояла из трех штрихов, профиль которых представлял собой окружность с радиусом 50 мкм. Диэлектрическая проницаемость металла клина принята как среднее значение для металлов в ТГц диапазоне: $\epsilon = -10^5 + i10^6$. С тем, чтобы показать преимущество использования дифракционных решеток, моделирование выполнено для клина с решеткой и без решетки (рис. 2). Как следует из рис. 2, амплитуда напряженности поля на острие клина с решеткой примерно в два раза больше напряженности поля на острие клина без решетки.

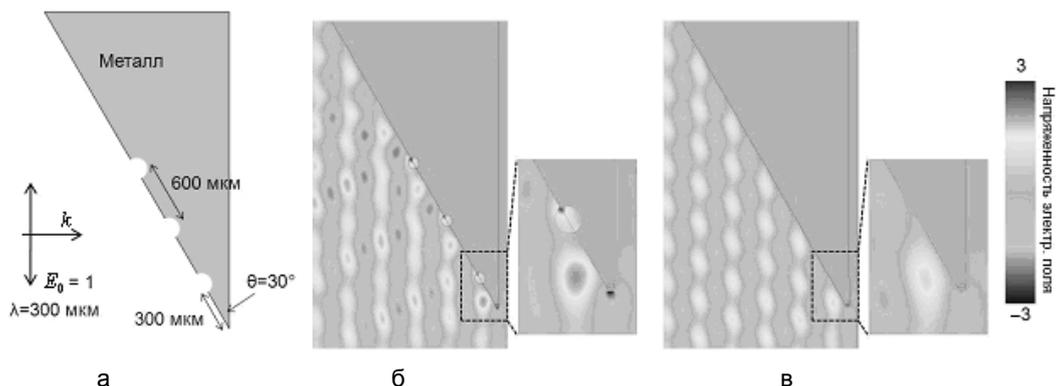


Рис. 2. Геометрические параметры клина с дифракционной решеткой и параметры падающей ЭМ волны (а); мгновенные значения напряженности электрического поля (E) при падении ТГц волны на клин с дифракционной решеткой (б) и клин без решетки (в)

Экспериментальная установка и методика

Классические ближнепольные зонды на основе заостренных металлических стержней могут быть созданы с помощью метода электрохимической заточки. Этот метод реализуется в специальных устройствах заточки зондов. Принцип метода основан на электрохимическом травлении проволоки в растворе щелочи при протекании электрического тока. Для придания проволоке формы конуса может быть использовано ее перемещение по вертикали.

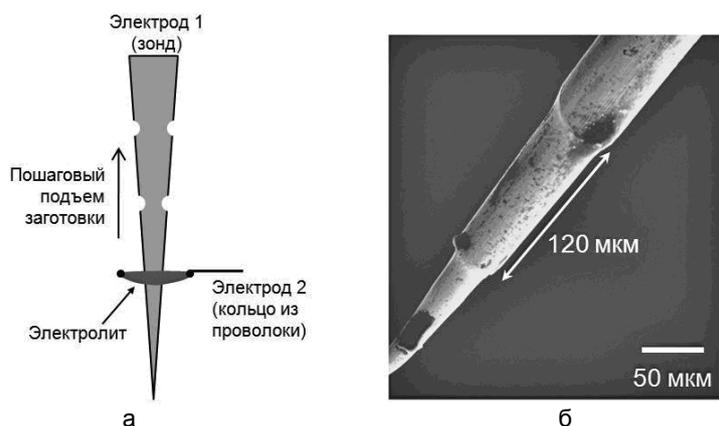


Рис. 3. Схематическая иллюстрация процесса травления периодической структуры колец на заостренном стержне (а). Электронное изображение заостренного стержня с протравленной периодической структурой (б)

Ближнепольные ТГц зонды с дифракционными решетками, рассмотренные далее, также могут быть созданы с помощью электрохимической заточки. Для этого сначала с помощью обычной процедуры заточки создавался заостренный стержень (концентрация раствора КОН 5%; шаг между травлениями – 2 мкм; время травления на каждом шаге – 2 с). Затем на стержне травились борозды (штрихи дифракционной решетки) с помощью специальной процедуры заточки, в которой программными методами задавались шаги перемещения стержня по вертикали, соответствующие периоду решетки, а травление осуществлялось между перемещениями (концентрация раствора КОН 5%; шаг между травлениями > 100 мкм; время травления на каждом шаге – 3 с). С помощью такой методики удавалось получать периодическую структуру колец на заостренном стержне (рис. 3).

Обсуждение результатов

В работе предложена новая конструкция ближнепольных ТГц зондов увеличенной эффективности на основе дифракционных решеток. Необходимо отметить, что данная конструкция ближнепольных ТГц зондов имеет преимущество перед другими типами конструкций [11, 12]: в ней не изменяется схема освещения и сбора ТГц излучения. Кроме того, как показано в данной работе, зонды с дифракционными решетками относительно просты в изготовлении.

Тем не менее, до проведения экспериментальных испытаний подобных зондов необходимо провести более точные расчеты и моделирование электродинамики, а также усовершенствовать методы создания таких зондов. Так, например, численное моделирование зондов необходимо проводить для трехмерного, а не двумерного случая. Кроме того, нужно учитывать, что штрихи дифракционной решетки на реально изготовленном зонде представляют собой кольца. Также необходимо совершенствовать технологию создания зондов с тем, чтобы получать зонды с требуемыми геометрическими параметрами.

Заключение

В работе рассмотрена возможность применения дифракционных решеток для увеличения эффективности ближнепольных ТГц зондов. Эффект основан на конструктивной интерференции волны, дифрагированной на решетке, и волны, направленной на острие зонда. При этом напряженность электрического поля на острие зонда с решеткой увеличивается в два раза по сравнению с зондом без решетки. Численное моделирование электродинамики ТГц зондов с дифракционными решетками, выполненное с помощью метода конечных разностей во временной области, подтверждает проведенные расчеты. В работе экспериментально рассмотрена возможность создания подобных зондов с помощью метода электрохимического травления.

Работа выполнена в рамках реализации и при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (ГК № П1285).

Литература

1. Lee Y.-S. Principles of Terahertz Science and Technology. – New-York: Springer, 2009. – 347 p.
2. Dexheimer S.L. Terahertz Spectroscopy: Principles and applications. – Boca Raton: CRC Press, 2008. – 331 p.
3. Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology // Nat. Photon. – 2007. – V. 1. – P. 97–105.
4. Беспалов В.Г., Городецкий А.А., Грачев Я.В., Козлов С.А., Новоселов Е.В. Импульсный терагерцовый рефлектометр // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – Т. 71. – № 1. – С. 19–23.
5. Mitrofanov O., Lee M., Hsu J.W.P., Brener I., Harel R., Federici J.F., Wynn J.D., Pfeiffer L.N., West K.W. Collection-mode near-field imaging with 0,5-THz pulses // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. – 2001. – V. 7. – № 4. – P. 600–607.
6. Cho G.C., Chen H.-T., Kraatz S., Karpowicz N., Kersting R. Apertureless terahertz near-field microscopy // Semicond. Sci. Technol. – 2005. – V. 20. – P. S286–S292.
7. Wang K., Mittleman D.M., van der Valk N.C.J., Planken P.C.M. Antenna effects in terahertz apertureless near-field optical microscopy // Appl. Phys. Lett. – 2004. – V. 85. – № 14. – P. 2715–2717.
8. Buergens F., Acuna G., Lang C.H., Potrebic S.I., Manus S., Kersting R. Shear force control for a terahertz near field microscope // Rev. Sci. Instrum. – 2007. – V. 78. – P. 113701.
9. Planken P.C.M., van der Valk N.C.J. Spot-size reduction in terahertz apertureless near-field imaging // Optics Lett. – 2004. – V. 29. – № 19. – P. 2306–2308.
10. Трухин В.Н., Андрианов А.В., Быков В.А., Голубок А.О., Зиновьев Н.Н., Самойлов Л.Л., Сапожников И.Д., Трухин А.В., Фельштын М.Л. Взаимодействие терагерцового электромагнитного излучения с системой зонд–объект в терагерцовом безапертурном ближнепольном микроскопе // Письма в ЖЭТФ. – 2011. – Т. 93. – № 3. – С. 134–138.
11. Maier S.A., Andrews S.R., Martín-Moreno L., García-Vidal F.J. Terahertz Surface Plasmon-Polariton Propagation and Focusing on Periodically Corrugated Metal Wires // Phys. Rev. Lett. – 2006. – V. 97. – P. 176805.
12. Rusina A., Durach M., Nelson K.A., Stockman M.I. Nanoconcentration of terahertz radiation in plasmonic waveguides // Optics Express. – 2008. – V. 16. – P. 18576.
13. Raether H. Surface plasmons on smooth and rough surfaces and on gratings. – New-York: Springer-Verlag, 1986. – 134 p.
14. Либенсон М.Н. Поверхностные электромагнитные волны оптического диапазона // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – № 10. – С. 92–98.

Тинская Мария Александровна – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, mashulik1@gmail.com
Денисюк Андрей Игоревич – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, доцент, aidenisyuk@gmail.com