ТОКИ СМЕЩЕНИЯ В НЕПРОВОДЯЩИХ ДИЭЛЕКТРИКАХ: "ГАДКИЙ УТЕНОК" СТАНОВИТСЯ ЛЕБЕДЕМ

А.Б.Шварцбург, д.ф.-м.н.,
Объединенный Институт Высоких Температур РАН,
Институт Космических Исследований РАН,
Москва

Мало того, чтобы облака незнания рассеялись дуновениями доказательств; после того надо еще, чтобы воссиял нам свет познания истины.
Т.Брадвардин (Лондон, 1290–1349)

Ключевыми словами в названии этой статьи мы обязаны двум гениям позапрошлого столетия: термин "диэлектрик" предложил М. Фарадей, "ток смещения" ввел Д. Максвелл. Судьбы этих нововведений сложились по-разному: в конце XIX века и электромоторы, и системы освещения, и зарождающаяся телефония использовали привычные токи проводимости в металлах; непроводящим диэлектрикам досталась скромная, но полезная роль изоляторов. В отличие от этого, "ток смещения" казался математическим фантомом, вставленным в одно из уравнений Максвелла, чтобы линии переменного тока в непроводящей среде не разрывались. Однако в реальных электрических цепях этот фантом проявился задолго до Максвелла, так что прямой вопрос "Что смещается в токе смещения?" имел предысторию.

РОЖДЕНИЕ ПАРАДИГМЫ

В учебниках физики английское имя "Thomson" встречается во многих разделах: Д.Д.Томсон, легендарный "Джи-Джи", – первооткрыватель электрона; его сын, Д.П.Томсон, – пионер электронной дифракции, оба – Нобелевские лауреаты, а еще – В.Томсон, один из "отцов – основателей" первого трансатлантического телеграфа, создатель абсолютной шкалы температур, удостоенный за свои открытия титула "Барон Кельвин";

DISPLACEMENT CURRENTS IN THE NON – CONDUCTING DIELECTRICS: THE "UGLY DUCKLING" BECOMES A SWAN

A.B.Shvartsburg, Dr. of Sc. (Phys. and Math.), Space Research Institute RAS, Joint Institute for High Temperatures of the RAS, Moscow

It is not enough, that the clouds of ignorance were dissipated by the winds of demonstration: it's in need after this, that the light of cognition would shine.
T.Bradwardine (London, 1290–1349)

The key words in the title of this article shall be owed to two geniuses of the century before last: the term "dielectric" has been suggested by M. Faraday; "displacement current" has been introduced by D. Maxwell. The fate of these innovations was developing in different ways: at the end of XIX century the electric motors, lighting systems and emerging telephony has been using habitual conduction currents in metals; non-conductive dielectrics has got a modest but a useful role of insulators. In contrast, the "displacement current" seemed to be a mathematical phantom, inserted in one of Maxwell's equations, in order to provide the continuity of AC line in a non-conductive medium. However, in actual electrical circuits this phantom was observed long before Maxwell, therefore a direct question "What is displaced in a displacement current?" had a long history.

THE BIRTH OF THE PARADIGM

In physics textbooks, the English name "Thomson" is found in many sections: J.J. Thomson, legendary "J.–J.", the discoverer of the electron; his son, J.P. Thomson, the pioneer of electron diffraction, both were the Nobel laureates; moreover, W. Thomson, one of the "fathers – founder' of the first transatlantic telegraph, the creator of the absolute temperature scale, awarded for his discoveries the title "Baron Kelvin"; namely this baron is remembered, while we speak about the low temperature, kelvins and millikelvins. At the beginning of his career W. Thomson, who became a

именно этого барона мы вспоминаем, говоря про низкие температуры, кельвины и милликельвины. В начале своей научной карьеры В. Томсон, ставший профессором в 22 года, создал первое устройство для генерации колебаний электрического тока в цепи (рис.1), содержащей батарею U, конденсатор (емкость C) и катушку индуктивности (самоиндукция L). При разряде конденсатора электрический ток проходил через катушку, возбуждая магнитное поле, а потом спад магнитного поля возбуждал ток, приводя к перезарядке конденсатора; энергия системы периодически перекачивалась от конденсатора к катушке и обратно. Этот "электрический маятник" вошел в учебники как "колебательный контур Томсона", период колебаний T определялся формулой

$$T=2\pi\sqrt{LC}. \quad (1)$$

Можно восхищаться изобретательностью молодого профессора, создавшего первый колебательный контур, один из ключевых элементов грядущей радиотехники, еще в те времена (1853 год), когда электрические исследования проводились на примитивных устройствах, похожих на причудливую мебель красного дерева (рис.2).

Однако, в момент появления новинка выявила парадокс: в отличие от токов, привычно текущих по проводникам, переменный ток почему-то проникал через пустой зазор между пластинами конденсатора, так что в линии тока в проводнике образовался разрыв. Если зазор был не пуст, например, заполнялся непроводящим диэлектриком, колебания тока в контуре все равно возникали. С другой стороны, непрерывность тока, понимаемая по аналогии с потоком жидкости в трубе, казалась очевидной: разрыв был невозможен, но он был! Несколько лет спустя конфликт теории с экспериментом разрешила гениальная догадка Максвелла, подтвердившая симметрию электрических и магнитных полей: как изменение магнитного поля $\vec{H}$ наводит ЭДС в проводнике (электромагнитная индукция), так, предположил Максвелл, и переменная во времени электрическая индукция $\vec{D}$ возбуждает магнитное поле $\vec{H}$. Такое возбуждение, по закону Ампера, можно приписать некоторому воображаемому току, который не связан с движением зарядов и возникает там, где меняется индукция $\vec{D}$, но – что важно! – индукция может меняться и в проводящей, и в непроводящей среде, и даже, в частности, в пустоте, где значение $\vec{D}$ равно электрическому полю $\vec{E}$. Обозначив привычный

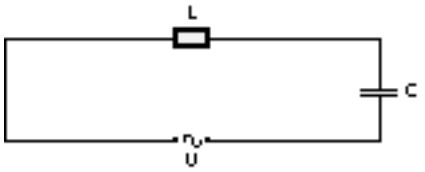

Рис.1. *Схема классического томсоновского колебательного контура без затухания: U – источник, C – конденсатор, L– индуктивность катушки*
Fig. 1. *Layout of classical Thomson lossless oscillating circuit: U – the source, C – capacitor, L - inductance coil*

professor at the age 22, has created the first device generating the oscillating electric current in the circuit (fig. 1) comprising a battery U, a capacitor (capacitance C) and an inductance coil (self-inductance L). When the capacitor was discharging, the electric current passing through the coil was exciting the magnetic field, and then the drop of magnetic field excited the current, providing the recharge of capacitor; energy of the system was migrating periodically from the condenser to the coil and back. This "electric pendulum" has become known as the "Thomson oscillating circuit", the oscillation period T is determined by formula

Рис.2. *Устройство, сделанное в Англии в 1854 году, для использования в лекциях для демонстрации силы электричества, путем поднятия кончиков волос у куклы-марионетки*
Fig. 2. *An apparatus made in England in 1854 for use in lectures demonstrated the power of electricity by making a puppet's hair stand on the end*

ток в проводнике как "ток проводимости", Максвелл дал своему нововведению и имя – "ток смещения", и формулу для расчета плотности этого тока:

$$\vec{j} = \frac{1}{4\pi} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}. \quad (2)$$

Новое понятие позволило Максвеллу написать основную систему уравнений электродинамики и предсказать существование особого вида колебаний – электромагнитных волн, энергия которых, как и в контуре Томсона, периодически переходит из электрической в магнитную и наоборот, а скорость этих волн оказалась равна скорости света в пустоте.

Представления о токах смещения и электромагнитных волнах укоренились в физическом сообществе не сразу, сам Максвелл не дожил до триумфа уравнений Максвелла. Прошло несколько лет, и Генрих Герц, экспериментируя с искрами в разрядниках, наглядно показал распространение электромагнитных волн через пустое пространство, разделяющее разрядники; более того, в другом опыте эти волны проходили и через слой диэлектрика – большую бетонную плиту. Чтобы объяснить распространение электромагнитной волны в непроводящей среде, пришлось признать существование тока смещения. В частном случае дипольного диэлектрика этот ток можно было наглядно представить как колебания диполей; в общем случае – гипотеза о токе смещения в пустоте апеллировала к модели механического смещения частиц воображаемого "мирового эфира", незримого и вездесущего, заполненного упругими "магнитными силовыми трубками", колебания которых воспринимались в этой модели как электромагнитные волны. Прошли годы, уравнения Максвелла вот уже почти полтора столетия дают работу десяткам тысяч инженеров и физиков; при этом рассуждения о таинственном "мировом эфире" с появлением теории относительности остались в пыльных архивах науки, а электродинамика токов смещения начала недавно обретать "второе дыхание".

НЕМАГНИТНЫЕ МАГНИТЫ

Концепция тока смещения казалась поначалу лишь удобным подручным средством, предназначенным обеспечить непрерывность линий тока. Действительно, этот новый объект электродинамики, хотя и назывался "током", имел мало общего с устоявшимися законами токов проводи-

$$T = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (1)$$

One can be delighted with the ingenuity of young professor who created the first oscillating circuit, one of the key elements of the future radio technique, back in those days (1853) when the electrical researches have been conducted on the primitive devices looking like fancy mahogany furniture (fig. 2).

However, at the time of appearance the novelty has revealed a paradox: in contrast to the currents usually flowing through the conductors, AC somehow worked through the empty clearance between the capacitor plates, so that the gap has been formed in the current line of the conductor. If the gap was not empty, for example, filled with non-conductive dielectric, the current oscillations in the circuit still occurred. On the other hand, the current continuity, understood by analogy with fluid flow in a pipe, seemed obvious: the gap was not possible, but there it was! A few years later the conflict between the theory and the experiment has been solved by a brilliant Maxwell's assumption which confirmed the symmetry of the electric and magnetic fields: similarly to change in the magnetic field $\vec{H}$ inducing voltage in the conductor (electromagnetic induction), time-varying electric induction $\vec{D}$, as Maxwell has suggested, excites the magnetic field $\vec{H}$. Such excitement, according to Ampere law, can be attributed to some imaginary current, which is not related to the motion of charges and occurs in the place where the induction $\vec{D}$ changes in time, but – what is important – induction can vary both in conductive and non-conductive medium, and even, in particular, in vacuum, where the value $\vec{D}$ is equal to the electric field $\vec{E}$. Designating the usual current in a conductor as "conduction current", Maxwell has named his innovation as "displacement current", and has introduced the formula for the calculation of this current density

$$\vec{j} = \frac{1}{4\pi} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}; \quad (2)$$

The new concept has allowed Maxwell to write a basic system of equations of electrodynamics and to predict the existence of a special type of oscillations – electromagnetic waves, whose energy, similar to Thomson circuit, is transforming periodically from electric to the magnetic energy and vice versa, and the speed of these waves was equal to the speed of light in vacuum.

SEMICON® RUSSIA

8-9 июня, 2016
Стратегический Симпозиум 7 июня

SEMICON® — это ведущий форум индустрии микроэлектроники в мире.

В 2016 году SEMICON Russia представит полную картину цепочки поставок: от материалов и оборудования до технологий производства, услуг, компонентов и приложений.

Впервые состоится Стратегический Симпозиум по Электронике и Высоким Технологиям, который пройдет 7 июня 2016 года.

Место проведения:
«Экспоцентр», Краснопресненская набережная, 14, Москва, 123100, Россия
Регистрация участников:
www.semiconrussia.org

Основные события Форума SEMICON Russia в 2016 году

- Российский Стратегический Симпозиум по Электронике и Высоким Технологиям
- Аллея высокотехнологичных кластеров России
- Стартап зона (Innovation Village)
- TechARENA
  - Силовая Электроника
  - Гибкая Электроника
  - МЭМС
  - Микросхемы: аппаратное и программное обеспечение
  - Индустрия 4.0
  - Умные города
- TechLOUNGE
  - Презентации участников
- Конференция по техническому зрению
- Российско-Тайваньский форум
- Российско-Китайская инвестиционная сессия
- Вечерний прием SEMI

semi

мости, составлявшими физические основы электротехники. В отличие от тока проводимости, ток смещения, оказался: а) пропорционален не электрическому полю $\vec{E}$, а скорости изменения этого поля (2), т.е. ток смещения не подчиняется закону Ома; б) пропорционален не проводимости среды, а ее диэлектрической проницаемости ε, определяющей электрическую индукцию $\vec{D}$ в уравнении (2): в изотропном диэлектрике $\vec{D}=\varepsilon\vec{E}$; в) непригоден для электронагрева: изменяя состояние поляризации диэлектрической среды, переменное электрическое поле стимулирует взаимодействие поляризованных молекул среды, обычно приводящее лишь к незначительному нагреву диэлектрика.

Единственное, что, казалось, роднило токи смещения и проводимости – и те, и другие могут возбуждать переменное магнитное поле, однако, свойства возбуждаемых полей сильно разнятся. Различия видны на простых примерах рассеяния линейно поляризованных электромагнитных волн на металлических и диэлектрических сферах. Задачу о металлической сфере, внутрь которой волны не проникают, рассматривали еще на заре радиофизики в начале прошлого века. Качественная картина рассеяния кажется несложной: под действием периодической электрической компоненты поля $\vec{E}$ (рис.3) на поверхностях полушарий попеременно наводятся положительные и отрицательные заряды, создавая электрический диполь $\vec{P}$, направленный вдоль $\vec{E}$. В это же время периодическая магнитная компонента поля $\vec{H}$ индуцирует поверхностные круговые токи I, формирующие магнитный диполь, момент которого $\vec{M}$ направлен вдоль $\vec{H}$. Излучение этих диполей в дальней зоне образует рассеянные волны, а в ближней зоне – стоячие волны, "прижатые" к поверхности шара.

В отличие от этой хрестоматийной картины, волны, падающие на непроводящий диэлектрический шар, частично проникают внутрь шара, возбуждая там сложную пространственную структуру токов смещения. При некоторых соотношениях между радиусом шара, диэлектрической проницаемостью ε и длиной падающей волны λ, соответствующих резонансному рассеянию, в шаре и в ближней зоне индуцируются значительные магнитные поля, превращающие диэлектрический шар, состоящий из немагнитного материала, в элемент магнитной структуры. Кроме того, управляя пространственной структурой токов смещения внутри шара, можно контролировать поток рассеянной энергии, т.е.

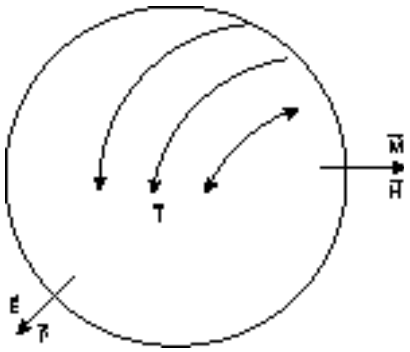

Рис.3. *Формирование электрического диполя $\vec{P}$ и магнитного диполя $\vec{M}$ вследствие поляризации металлической сферы и генерации поверхностных токов из-за рассеяния электромагнитной волны с электрическими $\vec{E}$ и магнитными $\vec{H}$ компонентами соответственно*

Fig. 3. *Formation of electric dipole $\vec{P}$ and magnetic dipole $\vec{M}$ due to polarization of metallic sphere and generation of surface currents $\vec{I}$ due to scattering of of electromagnetic wave with the electric and magnetic components $\vec{E}$ and $\vec{H}$ respectively.*

It took some time for the perceptions of displacement currents and electromagnetic waves to have been accepted by the physical community, Maxwell himself died before the triumph of Maxwell's equations. Several years have passed, and Heinrich Hertz, experimenting with sparks in the arresters, demonstrated the propagation of electromagnetic waves through the air separating the arresters. Moreover, in another experiment, these waves were propagating through the dielectric layer, a large concrete slab. To explain the propagation of electromagnetic waves in a non-conductive medium it was necessary to admit the existence of displacement current. In the particular case of dielectric dipole, this current can be visually represented as dipole oscillations in general, the hypothesis of displacement current in vacuum has appealed to the model of mechanical displacement of particles of imaginary "world ether", invisible and omnipresent, filled with elastic "magnetic field tubes", whose oscillations have been perceived in this model as the electromagnetic waves. Years later, Maxwell's equations give work to tens of thousands of engineers and physicists for almost a century and a half. Thus, the arguments about the mysterious "world ether" have been remained in the dusty archives of science with the advent of the theory of relativity, meanwhile the electromagnetics of displacement currents has recently got a second wind.

можно использовать такой диэлектрический шар для переизлучения волн в заданных направлениях [1].

Дальше – больше: интерес к токам смещения усиливается их резонансными свойствами. Эти свойства удобно иллюстрировать, сравнивая электромагнитную индукцию, наведенную одинаковыми переменными магнитными потоками $\Phi = \Phi_0 \sin \omega t$ в двух одинаковых тонких кольцах, одно из которых сделано из проводника, а другое – из диэлектрика (рис.4). Когда поток Φ пронизывает плоскости колец, в каждом из них наводится вихревое электрическое поле $\vec{E}$, пропорциональное, как известно, скорости изменения потока: $\vec{E} \| \frac{d\vec{B}}{dt}$; однако, сходство эффектов индукции в кольцах на этом заканчивается: ток в проводящем кольце пропорционален $\vec{E}$, а в непроводящем – производной от индукции (2), т.е., $\varepsilon \frac{d\vec{E}}{dt}$. Эти токи в свою очередь индуцируют вторичные магнитные потоки Φ_1. В непроводящем кольце возникает резонансная частота колебаний тока смещения ω_0 [2]; эффект напоминает давно известный "колебательный контур Томсона" (см. рис.1), но, в отличие от предшественника, осциллятор на рис.4 возбуждается токами смещения и не содержит ни проводов, ни металлических элементов, ни омических потерь. При приближении частоты ω к ω_0 амплитуда колебаний индуцируемого потока Φ_1 через непроводящее кольцо растет, а при переходе в область высоких частот $\omega > \omega_0$ направления индуцирующего Φ и индуцируемого Φ_1 потоков становятся противоположны. Записывая связь Φ и Φ_1 в виде $\Phi_1 = \mu\Phi$, можно отметить область частот $\omega_0^2 < \omega^2 < 2\omega_0^2$, где $\mu < 0$, что соответствует отрицательной магнитной восприимчивости кольцевого элемента.

Описанные здесь кольцевые токи смещения в диэлектрике образуют магнитные диполи. Магнитные поля более сложной структуры могут создаваться при движении поляризованного диэлектрика. Так, магнитный квадруполь, описанный еще в 1904 году в работе профессора Московского Университета А.А. Эйхенвальда "О магнитном действии тел, движущихся в электрическом поле" [3], создается при вращении круглого эбонитового диска между обкладками заряженного металлического конденсатора (рис.5). Заряды противоположного знака, наве-

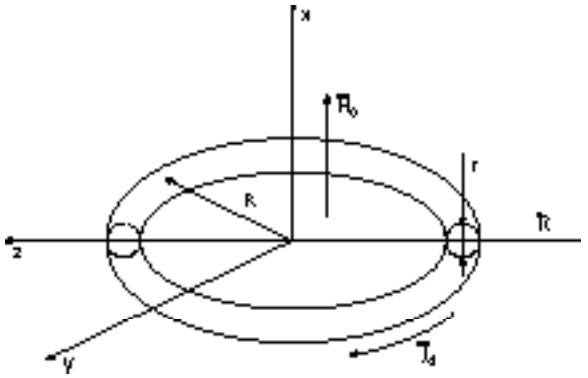

Рис.4. *Резонансное возбуждение электромагнитных колебаний в кольцеобразной цепи – полностью диэлектрическом тонком кольце (в плоскости линейно-поляризованной электромагнитной волны с волновым вектором $\vec{k}$ и электрической компонентой $\vec{E}$, падающей на кольцо, расположенной в $(\vec{k},\vec{E})$ плоскости; магнитная компонента $\vec{H}_0$ перпендикулярна $(\vec{k},\vec{E})$ плоскости; $\vec{J}_d$ – ток смещения в кольце*

Fig. 4. *Resonant excitement of electromagnetic oscillations in all-dielectric thin ring – shaped circuit. The plane linearly – polarized electromagnetic wave with wave vector $\vec{k}$ and electric component $\vec{E}$ incidents on the ring, located in $(\vec{k},\vec{E})$ plane; the magnetic component $\vec{H}_0$ is normal to $(\vec{k},\vec{E})$ plane; $\vec{J}_d$ – the displacement current in the ring.*

NON-MAGNETIC MAGNETS

At first appear, the displacement current concept seemed merely a convenient handy tool intended to ensure the continuity of the current lines. Indeed, this new object of electrodynamics, although called "current", had little to do with the established laws of the conduction currents, formed the physical basis of electrical engineering. Thus, in contrast to conduction current, displacement current, has proved to be: a) proportional not to the electric field $\vec{E}$, but to the velocity of change of the field (2), i.e. displacement current does not obey Ohm's law; b) proportional not to the conductivity of the medium, but to its dielectric permittivity ε, which determines the electrical induction $\vec{D}$ in equation (2): in an isotropic dielectric $\vec{D} = \varepsilon\vec{E}$; c) not suitable for electric heating: while changing the polarization state of the dielectric medium, alternating electric field stimulates the interaction of polarized molecules of the medium, resulting usually in a slight heating of the insulator.

The only thing that seemed to make the displacement current and conduction current kin is that they both can excite alternating magnetic field, however, the properties of the excited fields vary widely. The differences can be seen in the simple

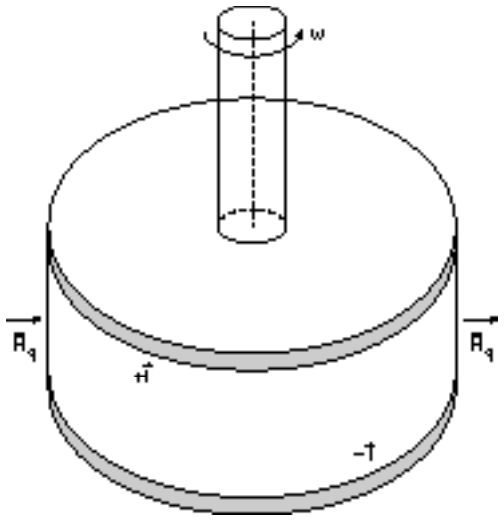

Рис.5. *Конвективные токи ±I, образующиеся в результате вращения диэлектрического диска с частотой ω между обкладками конденсатора, обеспечивают генерацию магнитного поля $\vec{H}_q$*

Fig. 5. *The convective currents ±I, formed due to rotation of dielectric disc with frequency ω between the plates of capacitor, provide the generation of magnetic field $\vec{H}_q$.*

денные на поверхностях вращающегося диска, образуют поверхностные токи ±I, текущие, соответственно, по и против часовой стрелки и формирующие квадрупольное магнитное поле $\vec{H}_q$; при постоянной скорости вращения диска это поле постоянно и проявляется в эксперименте по отклонению стрелки компаса.

Поскольку токи смещения сопутствовали быстрым изменениям индукции (2), то роль этих токов в разных частотных диапазонах сильно различалась: устройства радиотехники, предназначенные для частот до сотен гигагерц, были основаны на переносе зарядов, токи смещения были досадной помехой; в системах оптоэлектроники терагерцевого диапазона вклад токов смещения в формирование электромагнитных полей возрастал, а для полей видимого и ИК-спектра этот вклад мог стать определяющим. В электродинамику входило новое, ранее неслыханное физическое явление – концентрация переменных магнитных полей внутри немагнитных тел, намагничивание прозрачных непроводящих диэлектриков проходящим светом, "оптический магнетизм" [4]. Возникла надежда: не пригодятся ли эти быстрые изменения полей для решения грандиозной задачи – создания быстродействующего оптического компьютера?

examples of the scattering of linearly polarized electromagnetic waves on the metal and dielectric spheres. The problem of metal sphere which is not penetratable for the waves has been considered at the rise of radio physics at the beginning of the last century. A qualitative picture of scattering seems to be simple: under the influence of a periodic electric field $\vec{E}$ (fig. 3), positive and negative charges are alternatively induced on the surfaces of hemispheres, creating electric dipole $\vec{P}$ directed along $\vec{E}$. At the same time, periodic magnetic field $\vec{H}$ induces circular surface currents I, forming magnetic dipole whose moment $\vec{M}$ is directed along $\vec{H}$. Radiation of these dipoles forms scattered waves in the far field, and standing waves "pinned" to the surface of the sphere in the near field.

In contrast with this habitual picture, the waves, incident on a non-conductive dielectric sphere penetrate partially into the sphere, thus exciting a complex spatial structure of the displacement currents. Under certain ratios between the radius of the sphere, dielectric permittivity ε and the length of the incident wave λ, corresponding to the resonant scattering, significant magnetic field are induced both in the sphere and in the near field, converting the dielectric sphere consisting of a non-magnetic material, to a magnetic structure element. Furthermore, by controlling the spatial structure of displacement currents inside the sphere, it is possible to control the flow of dissipated energy, i.e. it is possible to use the dielectric sphere for the reradiation of waves in a given direction [1].

Moreover, the interest to displacement currents is intensified due to their resonant properties. These properties are conveniently illustrated by comparing the electromotive forces, induced by the same alternating magnetic flux $\Phi=\Phi_0\sin\omega t$ in two identical thin rings, one of which is made from conductor, and the other one – from non-polar dielectric (fig. 4). When the flux Φ is piercing through the ring planes, each of them is induced with the vortex electric field $\vec{E}$, proportional, as is known, to the velocity of flux change $\vec{E}\left[\frac{d\vec{\Phi}}{dt}\right]$; is induced in each ring; however, the similarity of induction effects in the rings is ended here: the current in the conductive ring is proportional to $\vec{E}$, meanwhile in the non-conducting one – to derivative of induction (2), i.e. $\varepsilon\frac{\partial\vec{E}}{\partial t}$. These currents in their turn induce secondary magnetic fluxes Φ_1. Resonant

Новый продукт:
Многоканальный комбинированный лазер Katyusha

- Три канала синхронизованного фемтосекундного излучения 1050, 525 и 800 нм (одновременно)
- Средняя мощность >1.2 Вт, >300 мВт и >300 мВт (одновременно)
- Возможность получения суммированных частот (опция)
- Самозапуск фемтосекундного режима
- Джиттер между 1050 нм и 800 нм <10 фс

Многоканальный комбинированный лазер Katyusha имеет три выходных канала фемтосекундного излучения с различными длинами волн. Все каналы излучения синхронизированы друг относительно друга, что позволяет легко проводить pump-probe и иные эксперименты с возбужденным состоянием образцов при сохранении высокого временного разрешения экспериментов. Данный твердотельный лазер включает в себя встроенный источник накачки, а также титан-сапфировый генератор, который может иметь перестраиваемую длину волны излучения.

	Katyusha
Длительность импульса (FWHM)	<200 фс на 1050 нм <100 фс на 800 нм <200 фс на 525 нм
Длины волн	1050±5 нм (фикс.) 800±10 нм (фикс.) 525±2 нм (фикс.)
Выходная мощность, только 1050 нм	>6 Вт
Выходная мощность, 1050 и 525 нм одновременно	>1.2 Вт на 1050 нм >3 Вт на 525 нм
Выходная мощность, 1050, 800 и 525 нм одновременно	>1.2 Вт на 1050 нм >300 мВт на 800 нм >300 мВт на 525 нм
Пространственная мода	TEM00

Фемтосекундные лазерные системы

Оптомеханика

Диагностика и компоненты

Спектрометры

www.avesta.ru fs@avesta.ru тел.: (495) 967-94-73
ООО "Авеста-Проект", ул. Физическая, д. 11, г. Троицк, г. Москва.

"МЕТАТРОНИКА" – НАНОЭЛЕКТРОНИКА МЕТАМАТЕРИАЛОВ

При переходе от гигагерцевого к оптическому диапазону вместе с длиной волны уменьшались и размеры передающих и принимающих устройств. Поначалу такая миниатюризация опиралась на схемы, разработанные в радиотехнике: СВЧ-волноводы стали образцами первых световодов, оптические резонаторы тоже имели СВЧ-"предков", возникло и "пограничное" научное направление – радиооптика. Однако при попытках создать оптические элементы с размерами порядка микронов и меньше, соизмеримые с длиной световой волны, такой перенос идей застопорился. В видимом и ИК-диапазоне оптические схемы не могут быть созданы подобно уменьшенным копиям устройств радиотехники. Для таких, наноразмерных, элементов понадобились и новые принципы, и новые материалы, и новые технологии – вслед за микроэлектроникой возникла наноэлектроника.

Новые принципы наноэлектроники воплотились в разработке оптических колебательных контуров, состоящих из элементов с размерами в десятки и сотни нанометров. Ключевые свойства таких элементов легко представить на примере цилиндрической наночастицы, длина которой l и диаметр d значительно меньше длины световой волны, а диэлектрическая проницаемость материала частицы описывается величиной ε (действительной или комплексной):

- в простом случае, когда электрическое поле волны $\vec{E}$ направлено вдоль оси цилиндра, можно оценить напряжение между торцами цилиндра $U=El$ и ток смещения, текущий между торцами $I = j\varepsilon S$, где S – площадь торца, а j – плотность тока смещения (2). В этой элементарной модели можно найти оптический импеданс Z из соотношения, связывающего

Профессор Надир Энгета придумал зарождающемуся разделу наноэлектроники краткое синтетическое имя – "метатроника"
Prof. Nader Engheta, transplanting the microwave circuits to the metamaterial nanooptical devices

frequency of displacement current oscillations ω_0 occurs in the non-conductive ring [2]; the effect resembles a well-known "Thomson oscillating circuit" (see fig. 1), but, unlike its predecessor, the oscillator in fig. 4 is excited with displacement currents and does not contain any wires or metallic elements with resistive losses. As the frequency ω approaches to ω_0, the amplitude of vibrations of the induced flux Φ through the non-conductive ring grows, and an unusual spectral range, where the directions of inducing Φ_0 and induced Φ flows are opposed, comes into play. While presenting the link of Φ and Φ_0 in the form $\Phi_0 = \mu\Phi$, we can note that in the frequency region $\omega_0^2 < \omega^2 < 2\omega_0^2$, parameter $\mu < 0$; this condition corresponds to a negative magnetic susceptibility of the circular element [2].

Circular displacement currents in the dielectric described herein form the magnetic dipoles. Magnetic fields of more complex structures can be created during motion of the polarized dielectric. Thus, the magnetic quadrupole described back in 1904 in the article of professor of Moscow University A. Eichenwald "The magnetic action of bodies moving in the electric field" [3], is created by rotation of the circular rubber disc between the plates of a charged capacitor (fig. 5). The charges of opposite sign induced on the surface of a rotating disc form surface currents $\pm I$ flowing, respectively, clockwise and counter-clockwise and generating the quadrupole magnetic field $\vec{H}_0$; at a constant speed of disc rotation, this field is manifested in the experiments on the deflection of the compass needle.

Since the displacement currents are generated due to rapid changes in the inductance (2), the role of these currents in different frequency ranges vary greatly: radio devices designed for frequencies up to hundreds of GHz, were based on the conduction currents and the displacement currents were viewed as an annoying interference; in the optoelectronic systems of THz range, the contribution of displacement currents to the formation of electromagnetic fields was increasing, and for the fields of visible and IR spectrum, this contribution could be decisive. A new, previously unheard physical phenomenon has been introduced into the electrodynamics – the concentration of alternating magnetic fields in the non-magnetic bodies, magnetization of transparent non-conductive dielectrics with transmitted light, "optical magnetism" [4]. A dream came into existence: may be these rapid changes of fields can open the

Рис.6. *Элемент полностью диэлектрической наноструктуры для локализации тока смещения в ядре, окруженном оболочкой; значения диэлектрической проницаемости для ядра и оболочки ε_1 и ε_2, соответственно, где $\varepsilon_1 >> \varepsilon_2$*

Fig. 6. *Element of all – dielectric nanostructure for localization of displacement current in the core surrounded by coatings; the values of dielectric permittivity for core and coatings ε_1 and ε_2 respectively, herein $\varepsilon_1 >> \varepsilon_2$*

ток I и напряжение U в цепи переменного тока: U=ZI; подставляя значения I и U, получим $Z=(i\omega C)^{-1}$, где C – емкость плоского конденсатора: $C=\varepsilon S(4\pi l)^{-1}$, величина $\varepsilon > 0$. Найденное значение Z совпадает с известным выражением для "емкостного сопротивления" томсоновского контура. В реальных наночастицах оптический импеданс зависит от формы, размеров и ориентации частицы по отношению к электрическому полю волны и значения ε;

- ток смещения, в отличие от тока проводимости, может вытекать из токонесущих элементов в другой диэлектрик или в воздух; такое перераспределение токов смещения, определяемое соотношением диэлектрических проницаемостей ε между соседними элементами, способствует концентрации этих токов в области больших значений ε. Так, тонкий слой диэлектрика с малым значением ε, окружающий наночастицу, можно рассматривать как изолятор, препятствующий вытеканию тока смещения из наночастицы. С другой стороны, среды с ε>>1, например, сегнетоэлектрики, играют роль проводников для токов смещения; такой проводник можно представить в виде слоистой структуры (рис. 6), напоминающей световод; впрочем, световод тоже является направляющей системой для токов смещения оптического диапазона;
- если диэлектрическая проницаемость ε зависит от частоты волны ω, то возможны такие области частот, в которых ε<0; так, в металлах, значения ε отрицательны для частот, меньших частоты коллективных колебаний металлической плазмы – "плазменной частоты" ω_p; для наночастиц из золота и серебра $\omega_p \sim 10^{15}$ rad/s, так что значения ε в видимом

way to solution of a grandiose problem – creation of a high-speed optical computer?

"METATRONICS" –NANOELECTRONICS OF METAMATERIALS

In the transition from GHz to optical range, decrease of wavelength influenced the decrease in the size of transmitting and receiving devices. Initially such miniaturization was based on the circuits developed in radio engineering: microwave waveguides have become the examples for the first optical fibers, optical cavities also had their microwave "ancestors", and a "borderline" scientific branch – radio optics came into play. However, while trying to create optical elements with dimensions of the order of microns or less compatible with the wavelength of light, such concepts transfer was stalled. In the visible and infrared range, the optical circuits cannot be created like reduced copies of radio engineering devices. To design such nanoscale elements new principles, new materials and new technologies were in need; microelectronics was followed by nanoelectronics.

The new principles of nanoelectronics are embodied in the development of optical resonant circuits consisting of the elements with dimensions of tens to hundreds of nanometers. Key properties of these elements can be easily visualized for a cylindrical nanoparticle whose length l and diameter d are considerably smaller than the light wavelength and the dielectric permittivity of particle material is described by some value ε:

- In the simplest case, when the electric field of wave $\vec{E}$ s directed along the cylinder axis, it is possible to evaluate the voltage between the ends of the cylinder U=El and displacement current flowing between the ends I = jS, where S is the butt-end area, and j– is displacement current density (2). In this elementary model, one can find the optical impedance Z from the relation connecting current I and voltage U in AC circuits: U=ZI; substituting the values I and U, we get $Z=(i\omega C)^{-1}$ where C is capacity of a plane capacitor: $C=\varepsilon S(4\pi l)^{-1}$ and the value $\varepsilon > 0$. The obtained value Z coincides with the well known expression for "capacitance" of Thomson circuit. In actual nanoparticles, the optical impedance depends on the shape, size and orientation of the particle with respect to the wave electric component and ε value.
- Displacement current, unlike the conduction current can flow out from the current-carrying

и ИК-диапазонах отрицательны. Для таких наночастиц оптический импеданс связан с "индуктивным сопротивлением". Использованием плазменных колебаний в тонких металлических пленках для обработки оптических сигналов занимается сегодня новое направление электроники – "плазмоника".

Оптические аналоги радиочастотных контуров, занимающие наноразмерные объемы, позволяют совместить в одном элементе свойства наноконденсатора, наноиндуктора и нанорезистора. Более того, такие элементы позволяют создать в некоторой области частот магнитную индукцию $\vec{B}$, направленную противоположно магнитному полю $\vec{H}$; в соотношении $\vec{B}=\mu\vec{H}$ это соответствует значениям $\mu<0$, т.е. элементу с отрицательной магнитной восприимчивостью [5]. Сред с $\mu<0$ в естественных условиях нет, а искусственные среды с таким свойством образуют один из классов новых композитных материалов, или, как их еще называют, метаматериалов. Именно использование метаматериалов открыло новый путь к внедрению в электронику нанооптических структур. Один из сегодняшних первопроходцев на этом пути, профессор Н. Энгета из Университета в Пенсильвании, придумал зарождающемуся разделу наноэлектроники краткое синтетическое имя – "метатроника" [6].

Метатроника показала, как синтезировать материалы для необычных наноструктур и проектировать их свойства, но возникла новая проблема – как вести сборку этих структур?

ИСКУССТВО СУБВОЛНОВОЙ МИНИАТЮРЫ

"Сборщик аппаратуры" для устройств метатроники имеет дело с миниатюрными деталями, размеры которых составляют от десятков до сотен нанометров, что меньше длины световой волны, так что можно говорить о субволновых оптических элементах, например [6], о колебательном контуре из стеклянного шарика радиусом 20 нм (емкость), покрытого тонкой серебряной оболочкой (индуктивность), или о резонаторе для ИК-волн в форме металлической подковы с размерами 300–400 нм и толщиной 20 нм (так и хочется сказать "наноподкова"!), напыленной на кварцевую подложку. Из этих элементов строятся трехмерные периодические структуры, похожие на искусственные кристаллы; периоды таких структур тоже измеряются в сотнях нанометров. В отличие от СВЧ-устройств, роль досад-

elements to an another insulator or to the air; such redistribution of displacement currents, defined by the ratio of dielectric permittivity ε between the adjacent elements, contributes to the concentration of these currents in the region of large values ε. Thus, a thin dielectric layer with a low value ε surrounding a nanoparticle can be viewed as an insulator, preventing the leakage of displacement current from the nanoparticles. On the other hand, the media with $\varepsilon>>1$, for example, ferroelectrics, play the role of guides for displacement currents; such a conductor may be presented as a layered fiber-like structure (fig. 6); note that, the optical fiber is also a guide system for optical range displacement currents.

- If the dielectric permittivity ε depends on the frequency of the wave ω, the frequency range with $\varepsilon<0$ can arise; thus, in metals, the values ε are negative for frequencies lower than the frequency of collective oscillations of metal plasma – "plasma frequency" ω_p; for the nanoparticles of gold and silver $\omega_p \approx 10^{16}$ rad/s, so that values ε in the visible and infrared ranges are negative. For these nanoparticles, optical impedance is associated with the "inductive resistance". The use of plasma oscillations in thin metal films for processing optical signals is currently studied by a new branch of electronics – "plasmonics".

Optical analogues of RF circuits occupying nanoscale volumes allow to combine the properties of nanocondenser, nanoinductor and nanoresistor in one element. Furthermore, these elements allow to create in a certain frequency range the magnetic induction $\vec{B}$, directed oppositely to the magnetic field $\vec{H}$; in the ratio $\vec{B}=\mu\vec{H}$ this corresponds to values $\mu<0$, i.e. element with negative magnetic permeability [5]. The media with $\mu<0$ do not exist in the nature, and man-made media with this property form one of the classes of new composite materials, so called metamaterials. It is the use of metamaterials that has opened a new path for the indoctrination of microwave – like circuits to the nanoelectronics. One of today's pioneers in this way, professor N. Engheta (Pennsylvania University, USA), had suggested the short synthetic name for this newly shaping part of nanoelectronics – "metatronics' [6].

Metatronics had shown how to synthesize materials for the unusual nanostructures and how to design their properties, but a new problem had arisen – how to build these structures?

ной помехи играют здесь токи проводимости – именно они создают омические потери.

Разветвленная сеть токов смещения, циркулирующих в пространственной решетке из наноэлементов, порождает противоречивую ситуацию: с одной стороны, такие токи, как уже отмечалось, имеют свойство вытекать из токонесущих структур. Эта утечка нарушает работу соседних элементов решетки, так что конструктору приходится "держать дистанцию" между элементами, обеспечивая совместимость всех элементов, образующих трехмерную наноструктуру. С другой стороны, стремление к миниатюризации системы требует сокращать эту дистанцию. Конкуренция обеих тенденций стимулирует оптимизацию оптических и геометрических параметров наноструктуры. При создании и, в особенности, при воспроизведении таких пространственных композиций специальные методы литографии, магнетронного напыления, электронных и ионных пучков стирают грани между искусством технолога и техникой ювелира, составляя зачастую "ноу – хау" самого производителя.

ШАГ ЗА ГОРИЗОНТ

Становление наноэлектроники превратило электродинамику токов смещения в стремительно развивающуюся область прикладной оптики. При этом развитии высветились и новые, пока еще чисто академические задачи; одна из них прямо следует из формулы (2), связывающей генерацию тока смещения с быстрым изменением электрической индукции $\vec{D}=\varepsilon\vec{E}$ в среде. До сих пор обсуждались изменения $\vec{D}$, вызванные изменениями электрического поля $\vec{E}$ при постоянном

ART OF SUBWAVELENGTH MINIATURES

An "assembler of apparatus' for metatronics devices deals with miniature parts with the dimensions ranging from tens to hundreds of nanometers, which is less than the wavelength of light, so that we can speak about the of subwavelength optical elements, for example, [6], about the of resonant circuit, formed by of the glass sphere with a radius of 20 nm (capacity), covered by with a thin silver shell (inductance), or a resonator for IR waves in the form of a metal horseshoe with the dimensions of 300–400 nm and 20 nm thick (one might say "nanohorseshoe!"), deposited on a quartz substrate. These elements are used to construct three-dimensional periodic structures, similar to artificial crystals; the periods of such structures are also measured in hundreds of nanometers. Unlike microwave devices, the role of an annoying interference is played by the conduction currents – they create resistive losses.

An extensive network of displacement currents circulating in the space grating of nanoelements generates a contradictory situation: from one hand, these currents, as already noted, tend to flow out from the current-carrying structures. This leakage violates the interaction of adjacent elements of the grating, so that the assembler has to "keep the distance" between the elements, ensuring compatibility of all elements, forming a three-dimensional nanostructure. From the other hand, the trend to miniaturization of the system requires the reduction of this distance. Competition of both trends stimulates the optimization of optical and geometrical parameters of the nanostructure. While creating and, in particular, while reproducing these

значении ε, но есть и другой механизм генерации такого тока – нестационарная диэлектрическая проницаемость, описываемая в определении (2) производной $\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}$; если скорость изменения ε достаточно велика, то заметный ток смещения, вызывающий электромагнитное излучение, может генерироваться даже в постоянном поле $\vec{E}$. Но как создать быстрые изменения ε?

В литературе обсуждается механизм генерации собственных мод в резонаторе, заполненном диэлектриком с изменяющимся во времени значением ε; такие изменения могут быть вызваны нелинейной модуляцией диэлектрической проницаемости волной накачки [7]. При модуляции ε перестраиваются собственные частоты резонатора; в частности, если частота модуляции равна удвоенной собственной частоте резонатора, то возникает известный эффект параметрической генерации. Другой механизм генерации токов смещения связан с распространением электромагнитного поля в диэлектрической среде, особенно в плазме, поляризация которой изменяется быстро, например, за время порядка периода колебаний поля. Если изменения поляризации сопровождаются движением границ среды, спектр излученной волны обогащается дополнительными допплеровскими гармониками. Такие комбинированные задачи характерны для новой главы электродинамики – оптики нестационарных сред. Сегодня такие быстродействующие изменения кажутся экзотическими, но интервалы между открытием эффекта и его применением сокращаются тоже быстро, и – кто знает? – возможно, завтра эффекты, связанные с переменной поляризацией, станут еще одним передним краем оптики.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Tribelsky M.I. et al.** – Scientific Reports 2015, v.5, p. 12288.
2. **Сигов А.С., Шварцбург А.Б.** – Доклады Академии наук, 2016, 469 (1).
3. **Эйхенвальд А.А.** – Избранные работы. – М.: Гостехиздат, 1956.
4. Miroshnichenko A.E. et al. – Optics & Photonics News, 2012, v.23 (12), p.35.
5. **Pendry J.B., Schurig D., Smith D.** – Science, 2006, v.312, p.1780.
6. **Engheta N.** – Science, 2007, v.317, p.1698 ().
7. **Meplan O., Gignoux C.** – Phys. Rev. Lett., 1996, v.76, p.408.

spatial compositions, special methods of lithography, magnetron sputtering, electron and ion beams blur the line between the art of a technologist and the technique of a jeweler, constituting often a "know-how" of the manufacturer.

STEP BEYOND THE HORIZON

The establishment of nanoelectronics has turned electrodynamics of displacement currents into the rapidly developing field of applied optics. This development has highlighted the new and yet purely academic problems; one of them is followed directly from formula (2), connecting the displacement current generation with the rapid variations of electric induction $\vec{D}=\varepsilon\vec{E}$ in the medium. So far, we discussed the changes $\vec{D}$ caused by changes in the electric field $\vec{E}$ the value ε being constant; however, there is another mechanism of generation of such current – time-dependent dielectric permittivity described in the definition (2) by derivative $\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}$; if the speed of variations ε is large enough, then noticeable displacement current providing the electromagnetic radiation, can be generated even in a constant field $\vec{E}$. But how one can create a rapid variations of ε?

The literature describes the mechanism of generation of eigenmodes in a cavity filled with a dielectric having a time-varying value ε; such changes may be caused by non-linear modulation of the dielectric permittivity by the pump wave [7]. Modulation of ε results in changes of the cavity eigenfrequencies. In particular, if the modulation frequency is equal to double eigenfrequency frequency of the cavity, there is a well known effect of parametric generation. Another mechanism for generating displacement currents is associated with the propagation of electromagnetic field in a dielectric medium, especially in plasma with rapidly varying polarization. If the polarization variations are stipulated by the movement of the boundaries of the medium, the spectrum of the emitted wave is enriched by additional Doppler harmonics. These combined problems are typical to a newly shaping branch of electromagnetics – optics of nonstationary media. Today, such quick variations seem to be somewhat exotic, but the temporal intervals between the discovery of effect and its use are reduced too fast, and – who knows? – perhaps tomorrow the effects associated with variable polarization will become an another front edge of optics.