ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ДИПОЛЬНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ В БЛИЖНЕЙ И ДАЛЬНЕЙ ЗОНЕ В КУРСЕ «ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА: ЭЛЕКТРОДИНАМИКА»

Studying of the electromagnetic field of a dipolar radiator in a near and far zone in course "theoretical physics: electrodynamics"

Гладенкова Светлана Наумовна, *кандидат физико-математических наук, доцент, Московский Педагогический Государственный Университет, Институт физики, технологии и информационных систем.*

gladenkova62@mail.ru

Михайлов Михаил Анатольевич, *кандидат физико-математических наук, доцент, профессор, Московский Педагогический Государственный Университет, Институт физики, технологии и информационных систем.*

mmihail66@yandex.ru

Рассмотрено электромагнитное поле дипольного излучателя в ближней и дальней зоне, его изучение в курсе «Теоретическая физика: электродинамика».

The electromagnetic field of a dipolar radiator in a near and far zone is considered, and the way this topic is studied in course "Theoretical physics: Electrodynamics".

Ключевые слова: **электромагнитное поле, дипольный излучатель, ближняя и дальняя зона.**

Keywords: **electromagnetic field; dipole radiator; the near and far fields.**

В настоящее время в связи с бурным развитием теоретических и экспериментальных методов изучения наноструктур широкое применение получают различные модификации зондовых микроскопов, которые позволяют получать разрешение, превосходящее разрешающую способность оптических микроскопов во много раз. Одним из таких микроскопов является микроскоп ближнего поля (МБП, ближнепольный) [1]. Его действие основано на свойствах электромагнитного поля в ближней зоне. В курсе «Теоретическая физика: электродинамика» обычно рассматривается электромагнитное поле в дальней (волновой) зоне [2]. В связи с развитием зондовой микроскопии и в методических целях целесообразнее рассматривать электромагнитное поле в дальней и ближней зонах параллельно.

При этом предполагается следующий подход к изложению данной проблемы.

1. Рассматриваются уравнения для потенциалов электромагнитного поля и их общее решение в виде запаздывающих потенциалов.

2. Формулируется качественное определение области ближнего и дальнего поля. Для ближнего поля имеем $L \ll r \ll \lambda$, где L – характерный размер излучающей зоны, λ– длина волны света, r– длина радиус-вектора точки, в которой ищется поле. Для дальней зоны (волновой) выполняется неравенство $r \gg \lambda$. Именно последнее неравенство лежит в основе вывода окончательных формул для электромагнитного поля излучения в дипольном приближении [1]. На основе последнего приближения в работе [2] выводится формула для векторного потенциала $\bar{A}$(41.4) и формула (41.5) для магнитного поля $\bar{B}$, далее на основе связи электрического поля $\bar{E}$ с магнитным полем $\bar{E} = [\bar{B}, \bar{n}]$, $\bar{n} = \bar{r}/r$ вычисляется электрическое поле.

3. Для параллельного рассмотрения поля в ближней и дальней зоне мы исходим из выражений для потенциалов электрического и магнитного поля, получающихся в разложении по малому параметру L/r общих формул в виде запаздывающих потенциалов [1]:

$$\varphi = \frac{q}{r} + \frac{(\bar{d}, \bar{n})}{r^2} + \frac{\left(\dot{\bar{d}}, \bar{n}\right)}{cr}, \qquad (1)$$

$$\bar{A} = \frac{\dot{\bar{d}}}{cr}. \qquad (2)$$

Формула (2) для потенциала магнитного поля совпадает с формулой (41.4) работы [2]. Далее в [2] при вычислении магнитного поля, как ротора потенциала (2), делается приближение $r \gg \lambda$, что справедливо для дальней зоны, но не выполняется в ближней зоне. Первое слагаемое в разложении скалярного потенциала (1) отвечает полю точечного заряда. Поскольку заряд системы предполагается равным нулю, то данное слагаемое обращается в нуль. Второе слагаемое отвечает потенциалу поля электрического диполя $\bar{d}$. Это слагаемое не учитывается в приближении волновой зоны [2]. Третье слагаемое есть скалярный потенциал излучения.

4. Для дальнейших выводов следует использовать формулу (2) для векторного потенциала и формулу (1) для скалярного потенциала, оставив в ней второе и третье слагаемые. Расчет магнитного и электрического полей дает следующий результат:

$$\bar{B} = \frac{\left[\ddot{\vec{d}}, \vec{n}\right]}{c^2 r} + \frac{\left[\dot{\vec{d}}, \vec{n}\right]}{c r^2}, \qquad (3)$$

$$\bar{E} = \frac{\left[\left[\ddot{\vec{d}}, \vec{n}\right], \vec{n}\right]}{c^2 r} + \frac{-\dot{\vec{d}} + 3\vec{n}\left(\dot{\vec{d}}, \vec{n}\right)}{c r^2} + \frac{-\vec{d} + 3\vec{n}(\vec{d}, \vec{n})}{r^3}. \qquad (4)$$

Отличие данных формул от формул работы [2] состоит в наличии второго слагаемого формулы (3) и в наличии второго и третьего слагаемых формулы (4). Пренебрегая данными слагаемыми, мы получаем выражения для полей в дальней (волновой) зоне. Данные поля убывают с расстоянием как $1/r$. Данное свойство полей может служить еще одним определением дальней зоны.

Рассмотрим слагаемые, отвечающие ближнему полю. Покажем, что решающий вклад в разрешающую способность МБП вносит третье слагаемое формулы (4). В работе [3],показано, что коэффициент поглощения света молекулой вещества пропорционален квадрату электрического поля. В ближней зоне электрическое поле содержит два слагаемых

$$\overline{E_b} = \frac{-\dot{\vec{d}} + 3\vec{n}\left(\dot{\vec{d}}, \vec{n}\right)}{c r^2} + \frac{-\vec{d} + 3\vec{n}(\vec{d}, \vec{n})}{r^3}. \qquad (5)$$

Второе слагаемое в формуле (5) в ближней зоне намного превосходит первое. Поэтому молекулы вещества в ближней зоне поглощают электромагнитную энергию эффективнее, чем молекулы вещества из дальней зоны. Флуоресценция молекул происходит тем эффективнее, чем больше поглощение. Следовательно, при возбуждении молекул через зонд МБП фотоумножитель (приемник) фиксирует только флуоресценцию ближних молекул, хотя возбуждаются молекулы ближней и дальней зоны. Поскольку ближняя зона по своим размерам меньше длины волны света, то **разрешающая способность МБП в десятки раз может быть больше разрешающей способности оптических микроскопов**.

🕮 БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Осадько И.С., Флуктуирующая флуоресценция наночастиц. Москва, Физматлит, 2011, 320 с.
2. Наумов А.И., Электродинамика. Москва, Прометей, МГПИ имени В.И. Ленина, 1989, 302 с.
3. Осадько И.С., Селективная спектроскопия одиночных молекул. Москва, Физматлит, 2000, 320 с.

Bibliography

1. Osad'ko I.S. Fluctuate Fluorescent Nanoparticles. Moscow, Physmatlit, 2011, p. 302.
2. Naumov A.I. Electrodynamics, Moscow. Prometei, MSPI, 1989, p. 302.
3. Osad'ko I.S. Selective Spectroscopy of Single Molecules, Moscow, Physmatlit, 2000, p. 320.