

05;07

Определение диэлектрической проницаемости проводящих пленок с использованием лазера

© В.А. Александров

Институт прикладной механики УрО РАН, Ижевск
E-mail: ava@udman.ru

В окончательной редакции 5 июня 2008 г.

Показана возможность использования лазера для экспериментального определения диэлектрической проницаемости материала проводящих пленок в оптическом диапазоне частот.

PACS: 73.50.Pz, 79.20.Ds

В [1] указывалось на перспективность использования углеродных нанотрубок в качестве терагерцовых излучателей путем разогрева электронного газа продольным электрическим полем, направленным вдоль оси нанотрубки, обладающей металлическим типом проводимости. На практике быстрый разогрев электронов в проводящих материалах может осуществляться электрическим полем достаточно мощного импульса лазера. Для этого достаточно использовать проводящие пленки толщиной меньше одного микрона, так как лазерное излучение может проникать в материал проводящей пленки не более глубины скин-слоя $d = 1/\sqrt{\pi\mu_0\mu\sigma f}$, где $\mu_0 = 12.566 \cdot 10^{-7}$ Н/м — магнитная постоянная, μ — магнитная проницаемость, когда для неферромагнитных материалов равна 1, σ — проводимость материала пленки, f — частота лазерного излучения. Расчетная глубина скин-слоя графита с проводимостью $\sigma = (70-140) \cdot 10^3$ S/m для лазерного излучения на длине волны $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$ составляет около $0.1 \mu\text{m}$. Для создания эффективных терагерцовых излучателей из наноуглеродных пленок необходимо учитывать их диэлектрическую проницаемость.

В работе [2] обсуждалось, что фотоэлектрический эффект в проводящих пленках, в частности возникновение ЭДС в наноуглеродных пленках при воздействии импульсами лазера [3], может объясняться

взаимодействием фотонов с электронами в скин-слое пленок или фотоэлектрическим эффектом [4], возникающим за счет увлечения электронов фотонами. На эффект фотонного увлечения электронов в наноуглеродных пленках, представляющих собой тонкий слой кристаллитов графита, указывает то, что графит по проводимости является полуметаллом и при изменении угла падения пучка лазера на противоположный угол изменяется направление проекции импульса света на поверхность пленки. О наблюдении фотонного увлечения электронов в полуметаллах сообщалось в [5], а о характерном для этого эффекта изменении знака ЭДС при изменении направления импульса света — в [6].

В простом случае импульс электрона отдачи при обратном рассеянии фотона практически составит $p_e = 2\hbar\omega/c$, где ω — частота фотона, c — скорость света. В связи с этим при воздействии импульса лазера на поверхность проводящей пленки электрон в скин-слое приобретает дополнительную скорость в направлении вдоль поверхности пленки

$$\Delta V_{ex} = 2(\hbar\omega/m_e c) \sin \alpha, \quad (1)$$

где m_e — масса электрона, α — угол преломления электромагнитной волны в материале пленки.

Плотность продольного тока в скин-слое пленки при этом составит

$$j_x = 2(en_e\hbar\omega/m_e c) \sin \alpha, \quad (2)$$

где e — заряд электрона, n_e — количество взаимодействующих с фотонами электронов в единице объема скин-слоя пленки. Объем V_d скин-слоя пленки, в котором происходит взаимодействие фотонов с электронами, равен произведению глубины d скин-слоя и площади облучаемой пучком лазера поверхности, определяемой сечением S_b пучка и углом его падения α_1 :

$$V_d = dS_b / \cos \alpha_1. \quad (3)$$

Импульс лазера обычно имеет огибающую и поэтому интенсивность I фотонов в пучке такого импульса зависит от времени $I = I(t)$. При наносекундных длительностях импульса лазера количество фотонов в единице объема скин-слоя пленки можно выразить как

$$n_f(t) = I(t) \cos \alpha_1 / \hbar\omega c. \quad (4)$$

Для неферромагнитных материалов с диэлектрической проницаемостью ε , близкой к 1, угол преломления практически равен углу падения электромагнитной волны к поверхности пленки. В рассматриваемой модели проводящих пленок для начала примем, что угол преломления равен углу падения электромагнитной волны.

Учитывая коэффициент электрон-фотонного взаимодействия материала пленки $\kappa_e = (n_e/n_f)/c\tau$ и подвижность электронов $\mu = \tau e/m_e$, где τ — время между их столкновениями, а также условие $\alpha_1 = \alpha$, выражение (2) для плотности продольного тока в скин-слое пленки можно привести к виду

$$j_x(t) = (\kappa_e \mu / c) I(t) \sin 2\alpha. \quad (5)$$

Последнее выражение показывает, что максимальное значение плотности продольного тока в скин-слое пленки получается при воздействии пучком лазера, когда угол преломления равен $\alpha = \pm\pi/4$.

Возникновение переменного ЭДС $U_x(t)$ на участке Δx облучаемой импульсом лазера части поверхности пленки обусловлено продольным током $j_x(t)$ в скин-слое пленки и проводимостью σ этого участка $U_x(t) = j_x(t)\Delta x/\sigma$, поэтому зависимость сигнала фотоэлектрического эффекта от угла α получается аналогичной (5).

Для определения диэлектрической проницаемости материала проводящей пленки можно воспользоваться известной формулой

$$\sqrt{\varepsilon} = \sin \alpha_1 / \sin \alpha. \quad (6)$$

Угол падения α_1 определяется из эксперимента, при котором регистрируется максимальное значение сигнала фотоэлектрического скин-эффекта на электродах, размещенных на поверхности пленки. Так как при этом угол преломления $\alpha = \pi/4$ и $\sin^2 \pi/4 = 1/2$, то $\varepsilon = 2 \sin^2 \alpha_1$.

В работе [3] показано, что для наноуглеродных пленок $\alpha_1 = 50^\circ$. Тогда диэлектрическая проницаемость графита в оптическом диапазоне частот составит $\varepsilon = 1.17$, значение которого является близким к значениям диэлектрической проницаемости в СВЧ-диапазоне резистивных нитей из графита, рассчитанным по другим методикам [7].

Таким образом, диэлектрическая проницаемость материала проводящей пленки может быть определена с использованием лазера. При этом значение диэлектрической проницаемости равно удвоенному значению квадрата синуса угла падения пучка лазера, при котором регистрируется

максимальное значение фотоэлектрического скин-эффекта. Предлагаемая методика может быть применена для оценки диэлектрической проницаемости в оптическом диапазоне частот и других проводящих пленок, в том числе из композиционных материалов, используемых в электронике, а также тонких диэлектрических пленок на поверхности проводящих пленок.

В технической реализации эта методика проста и не требует использования сложной интерференционной системы, которая используется в известных способах определения диэлектрической проницаемости твердых тел с использованием лазера, где лазерное излучение преобразуется в поверхностную электромагнитную волну, параметры которой содержат информацию о свойствах поверхности твердых тел [8,9].

Список литературы

- [1] *Кибис О.В., Портной М.Е.* // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 15. С. 85–89.
- [2] *Александров В.А.* // Альтернативная энергетика и экология. 2007. № 11. С. 110–113.
- [3] *Михеев Г.М., Зонов Р.Г., Образцов А.Н., Свирко Ю.П.* // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 17. С. 88–94.
- [4] *Зеегер К.* Физика полупроводников. М.: Мир, 1977. Гл. 11. С. 500.
- [5] *Берегулин Е.В., Валов П.М., Рывкин С.М.* и др. // Письма в ЖЭТФ. 1977. Т. 25. В. 2. С. 113–116.
- [6] *Берегулин Е.В., Воронов П.М., Иванов С.В.* и др. // Письма в ЖЭТФ. 1994. Т. 59. В. 2. С. 83–85.
- [7] *Гарин Б.М., Дьяконова О.А., Казанцев Ю.Н.* // ЖТФ. 1999. Т. 69. В. 1. С. 104–108.
- [8] *Алиева Е.В., Жижин Г.Н., Кузик Л.В., Яковлев В.А.* // ФТТ. 1998. Т. 40. В. 2. С. 213–216.
- [9] *Жижин Г.Н., Никитин А.К., Рыжова Т.А.* // Патент РФ № 22639238. Бюл. № 31.10.11.2005.