

Г. М. МИХЕЕВ, Р. Г. ЗОНОВ, А. Н. ОБРАЗЦОВ, В. М. СТЯПШИН

ВЛИЯНИЕ ПРОЗРАЧНОГО ПОКРЫТИЯ НА ОПТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ СИГНАЛ В НАНОГРАФИТНЫХ ПЛЕНКАХ

Приведены результаты исследования влияния прозрачного покрытия нанографитной пленки на амплитуду оптоэлектрического сигнала, возникающего в пленке при ее облучении лазерными импульсами наносекундной длительности. Показано, что при нанесении покрытия существенно изменяется зависимость амплитуды сигнала от угла падения луча лазера на поверхность пленки, что может быть использовано для модернизации датчика пространственного положения объекта, изготовленного из нанографитной пленки.

Ключевые слова: нанографитные пленки, оптоэлектрический сигнал, термическое напыление.

Известно, что наноструктурированные материалы представляют интерес не только для фундаментальных исследований, но и для решения различных прикладных задач. С учетом возможности практического применения особого внимания заслуживает исследование наноуглеродных материалов, которые могут иметь форму нанотрубок, фуллеренов, луковиц, графенов и т.д. В частности, углеродные нанотрубки и нанографитные пленки можно использовать для изготовления низковольтных холодных катодов [1, 2]. На основе результатов исследований оптоэлектрических свойств этих материалов созданы уникальные оптоэлектронные устройства, состоящие из одиночных одностенных углеродных нанотрубок [3—5]. Такие устройства весьма чувствительны к изменению длины волны и поляризации электромагнитного излучения (временной отклик находится в миллисекундном диапазоне).

В работах [6—8] было установлено, что при облучении нанографитных пленок лазерным излучением наносекундной длительности в них возникает импульс электрического напряжения, повторяющий форму лазерного импульса. При этом амплитуда оптоэлектрического сигнала существенно зависит от поляризации излучения и пространственной ориентации нанографитной пленки относительно падающего луча света, кроме того, амплитуда линейно возрастает с увеличением мощности (а не плотности мощности) излучения лазера. Полученные результаты объясняются эффектом оптического выпрямления нелинейности второго порядка [6] и позволяют создать быстродействующий фотоприемник, работающий в широком спектральном диапазоне [9]. Такой фотоприемник можно использовать для создания датчика пространственного положения объекта [10]. При p -поляризованном излучении датчик может работать в диапазоне углов падения α луча на пленку от $\alpha_{\min} = -45^\circ$ до $\alpha_{\max} = 45^\circ$, что обусловлено характерной зависимостью амплитуды U оптоэлектрического сигнала от угла α . Для улучшения характеристик датчика пространственного положения объекта, изготовленного из нанографитной пленки, предлагается расширить диапазон рабочих углов $\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$, в пределах которого происходит монотонное возрастание амплитуды оптоэлектрического сигнала, — именно эта проблема и является предметом исследования в настоящей статье.

На рис. 1, *a* приведена схема [6], отражающая эксперимент по наблюдению оптоэлектрического сигнала в нанографитных пленках. Нанографитная пленка 1, выращенная на подложке 2 из кремния, с помощью двух параллельных электродов 3 и 4 прикрепляется на диэлектрическом держателе 5. Электроды подсоединяются ко входу широкополосного осциллографа. При облучении поверхности пленки импульсом наносекундной длительности p -поляризованного излучения лазера между электродами возникает импульс электрического

напряжения, форма которого повторяет форму лазерного импульса. Экспериментальная зависимость U от α описывается следующей формулой:

$$U/U_0 \approx \sin 2\alpha, \quad (1)$$

где U_0 — максимальное значение амплитуды сигнала.

В интервале $|\alpha| \leq \alpha_{\max}$, где $\alpha_{\max} = 45^\circ$, по измеренному значению U можно определить угол падения. В диапазоне углов $-90^\circ < \alpha < 90^\circ$ наблюдается неоднозначность, так как одному и тому же значению U соответствуют два разных значения α . В связи с этим представляет интерес увеличение значения α_{\max} .

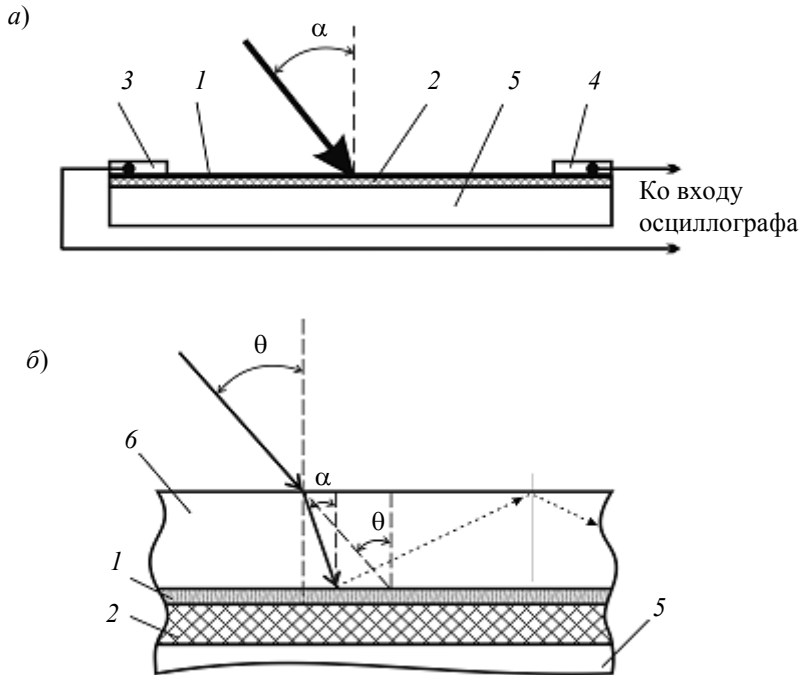


Рис. 1

Зависимость (1) определяется природой оптоэлектрического эффекта в нанографитных пленках. Однако она может быть несколько изменена, если ввести дополнительную зависимость угла падения α луча на нанографитную пленку от другого угла θ , характеризующего наклон плоскости фотоприемника относительно падающего пучка лазера. На практике это можно осуществить, если нанографитную пленку покрыть тонким слоем прозрачной жидкости.

Представим, что нанографитная пленка 1 покрыта слоем смачивающей прозрачной жидкости 6 (рис. 1, б). Тогда луч, падающий на поверхность жидкости под углом θ , после преломления на границе раздела сред воздух — жидкость падает на поверхность нанографитной пленки под углом α . Эти углы связаны соотношением

$$\sin \theta / \sin \alpha = n, \quad (2)$$

где n — показатель преломления прозрачной жидкости относительно воздуха.

Следовательно,

$$\alpha = \arcsin(\sin \theta / n), \quad (3)$$

и для всех углов θ будет выполняться неравенство $\alpha < \theta$. Необходимо иметь в виду, что на границе раздела сред прозрачная жидкость — нанографитная пленка будет происходить дополнительное преломление луча, однако, для простоты, этим преломлением будем пренебрегать. Тогда рассчитанная зависимость $\alpha(\theta)$ при $n = 1,38$ (этиловый спирт) будет иметь вид, представленный на рис. 2. В этом случае при изменении угла θ от -90 до 90° угол α изменится в пределах от $-46,4$ до $46,4^\circ$. С учетом этого рассчитанная зависимость (1) с аргументом α , определяемым выражением (3), будет иметь вид кривой 1 , показанной на рис. 3. В соответ-

ствии с этой кривой при $|\theta| > 70^\circ$ амплитуда сигнала U/U_0 практически не зависит от θ . Однако при построении кривой 1 не учитывалось изменение коэффициента отражения света от жидкости при изменении угла θ .

Для p -поляризованного излучения света коэффициент отражения от прозрачной поверхности задается выражением [11]

$$R_p = \left[\frac{\operatorname{tg}(\theta - \alpha)}{\operatorname{tg}(\theta + \alpha)} \right]^2. \tag{4}$$

Отсюда следует, что мощность P_α лазерного излучения, падающего на нанографитную пленку под углом α , будет определяться как

$$P_\alpha = (1 - R_p)P_0, \tag{5}$$

где P_0 — мощность лазерного излучения, падающего на поверхность прозрачной жидкости.

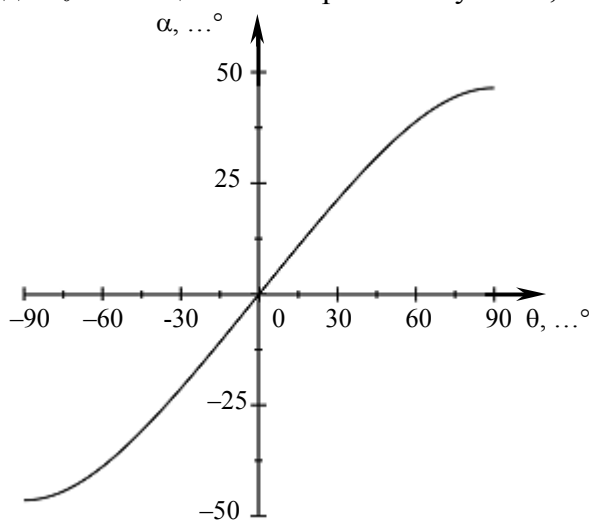


Рис. 2

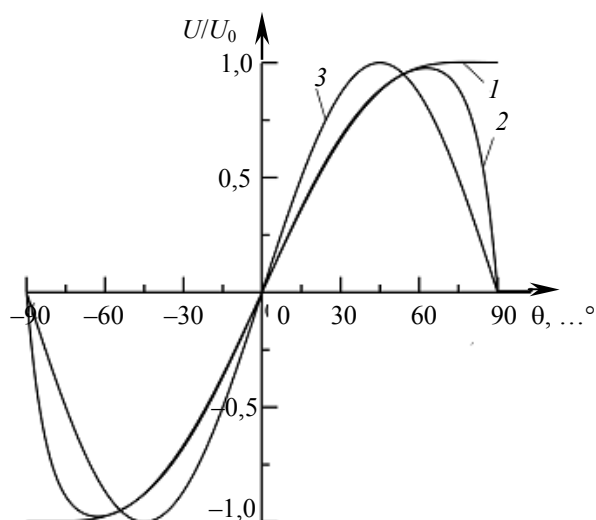


Рис. 3

Согласно экспериментам, описанным в работах [6, 7], амплитуда оптоэлектрического сигнала U прямо пропорциональна мощности P_α . Следовательно, с учетом соотношений (1) — (5) можно построить зависимость U/U_0 от θ (см. рис. 3, кривая 2), показывающую, что монотонное возрастание величины U/U_0 наблюдается при $|\theta| \leq 62,8^\circ$. Этот диапазон углов монотонного возрастания сигнала примерно на 36° больше, чем для кривой 3 (см. рис. 3), построенной по формуле (1). Необходимо отметить, что при построении кривой 2 не учитывалось переотражение света на границе раздела сред жидкость — нанографитная пленка.

Таким образом, можно предположить, что применение жидкости, смачивающей нанографитную пленку, позволит увеличить диапазон углов отклонения фотоприемника, при котором наблюдается монотонное возрастание оптоэлектрического сигнала.

При проведении экспериментов исследовалась амплитуда оптоэлектрического сигнала U в нанографитных пленках с покрытием из прозрачной жидкости и без покрытия в зависимости от угла падения θ в соответствии со схемой, представленной на рис. 1.

Нанографитные пленки были получены методом плазмохимического осаждения из смеси метана и водорода на установке, описанной в работе [12]. Основными структурными элементами пленок являются пластинчатые кристаллиты, состоящие из нескольких (от 5 до 50) параллельных хорошо упорядоченных атомных слоев графена [13]. По данным спектроскопии комбинационного рассеяния света, электронной и рентгеновской дифракции, а также электронной микроскопии высокого разрешения атомная структура кристаллитов соответствует хорошо упорядоченному графиту. Толщина таких нанокристаллитов графита составляет от 2 до 20 нм. При этом кристаллиты имеют преимущественную ориентацию атомных слоев

в направлении нормали к поверхности подложки с максимальным отклонением не более $\pm 20^\circ$. Расстояние между отдельными кристаллитами составляет примерно 0,5—1 мкм. Таким образом, пленки имеют ярко выраженную пористую нанокристаллическую структуру. Средняя толщина этих наноуглеродных пленок 2—3 мкм.

Для облучения пленок использовалось *p*- и *s*-поляризованное излучение YAG:Nd^{3+} -лазера, работающего в одномодовом режиме. Длительность лазерных импульсов по полувысоте составляла 20 нс, диаметр пучка 2 мм. Для регистрации оптоэлектрического импульса применялись два параллельных полосковых золотых электрода, нанесенные на противоположные стороны пленки методом термического напыления в вакууме. Импульс электрического напряжения, возникающий между этими электродами при облучении поверхности пленки, регистрировался с помощью цифрового осциллографа „Tektronix TDS7704B“ с входным сопротивлением 50 Ом. Нанографитная пленка, прикрепленная к диэлектрическому держателю, фиксировалась с помощью специального приспособления, позволяющего осуществлять плавное изменение угла падения лазерного пучка на пленку. При этом обеспечивалось падение пучка лазера на одно и то же место пленки.

В качестве прозрачных жидкостей для покрытия поверхности нанографитной пленки использовались этиловый спирт и трансформаторное масло. Эксперименты проводились следующим образом. При фиксированных значениях энергии лазерного излучения (около 2 мДж) и угла падения измерялась амплитуда оптоэлектрического сигнала. Далее, с помощью шприца струя жидкости направлялась на верхнюю часть поверхности пленки, и после покрытия жидкостью всей поверхности (что можно наблюдать по характерному изменению цвета нанографитной пленки) производились измерения. За результат измерения принималось усредненное значение амплитуды сигнала, полученное при 30 и более вспышках лазера. При использовании спирта через некоторое время жидкость полностью испарялась с поверхности, и измерения повторялись уже без спирта.

Как показали эксперименты, после покрытия поверхности пленки прозрачной жидкостью амплитуда оптоэлектрического сигнала заметно изменяется, что подтверждается зависимостями, представленными на рис. 4.

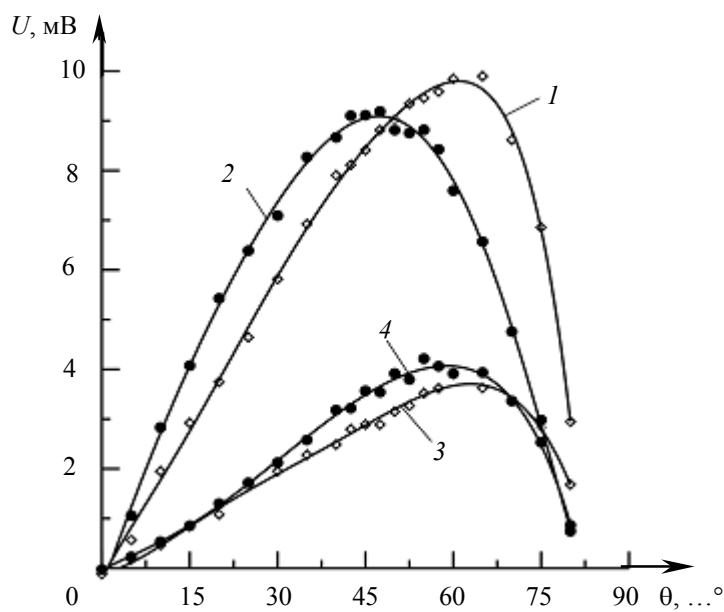


Рис. 4

Видно, что для *p*- и *s*-поляризаций излучения лазера нанесение тонкого слоя этилового спирта на поверхность пленки приводит к специфическому изменению зависимости U от θ . Необходимо отметить, что после самопроизвольного испарения спирта с поверхности нанографитной пленки значения оптоэлектрического сигнала восстанавливались. Максимальные

значения зависимостей, полученных с применением жидкости (см. рис. 4, кривые 1, 3), смещены в область больших значений θ по сравнению с максимумами соответствующих зависимостей, полученных без применения жидкости (кривые 2, 4).

Аналогичные результаты были получены при использовании в качестве смачивающей прозрачной жидкости трансформаторного масла.

Результаты экспериментов хорошо согласуются с результатами предварительного анализа.

Следует пояснить отличие максимума амплитуды оптоэлектрического сигнала при p -поляризации, наблюдаемой при $\theta \approx 65^\circ$ (при покрытии поверхности пленки этиловым спиртом — см. рис. 4, кривая 1), от максимальной амплитуды, полученной при $\theta \approx 45^\circ$ (при чистой поверхности нанографитной пленки — кривая 2). Объяснением этому может быть следующее. При падении луча лазера на шероховатую поверхность пленки в угловом спектре отраженного света присутствуют лучи, которые направляются на поверхность границы раздела сред жидкость — воздух под большими углами (см. рис. 1, б). На этой границе происходит полное внутренне отражение и лучи вновь поступают на нанографитную пленку, способствуя тем самым некоторому увеличению оптоэлектрического сигнала.

Таким образом, как показали эксперименты, прозрачное покрытие, нанесенное на поверхность нанографитной пленки, существенно влияет на амплитуду оптоэлектрического сигнала и приводит к изменению ее зависимости от угла падения луча лазера. Это может быть использовано для улучшения характеристик датчика пространственного положения объекта, изготовленного из нанографитной пленки.

Работа выполнена по государственному контракту № 02.513.11.3048 от 22.03.2007 г. (шифр „2007-3-1.3-07-01-095“).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Образцов А. Н., Павловский И. Ю., Волков А. П. Автоэлектронная эмиссия в графитоподобных пленках // ЖТФ. 2001. Т. 71. С. 89—95.
2. Cui J. B., Robertson J., Milne W. I. Field emission site densities of nanostructured carbon films deposited by a cathodic arc // J. Appl. Phys. 2001. Vol. 89. P. 5707—5711.
3. Freitag M., Martin Y., Misewich J. A. et al. Photoconductivity of single carbon nanotubes // Nano Lett. 2003. Vol. 3, N 8. P. 1067—1071.
4. Freitag M., Perebeinos V., Chen J. et al. Hot carrier electroluminescence from a single carbon nanotube // Nano Lett. 2004. Vol. 4. N 6. P. 1063—1066.
5. Freitag M., Chen J., Tersoff J. et al. Mobile ambipolar domain in carbon-nanotube infrared emitters // Phys. Rev. Lett. 2004. Vol. 93. N 076803.
6. Mikheev G. M., Zonov R. G., Obratsov A. N., Svirko Yu. P. Giant optical rectification effect in nanocarbon films // Appl. Phys. Lett. 2004. Vol. 84, N 24. P. 4854—4856.
7. Михеев Г. М., Зонов Р. Г., Образцов А. Н., Сvirko Ю. П. Оптическое выпрямление в углеродных нанопленках // ЖЭТФ. 2004. Т. 126, № 5. С. 1083—1088.
8. Михеев Г. М., Зонов Р. Г., Образцов А. Н. Генерация наносекундных электрических импульсов при лазерном облучении нанографитных пленок // Изв. вузов. Приборостроение. 2006. Т. 49, № 9. С. 33—37.
9. Михеев Г. М., Зонов Р. Г., Образцов А. Н. и др. Быстродействующий фотоприемник мощного лазерного излучения на основе нанографитной пленки // ПТЭ. 2005. № 3. С. 84—89.
10. Зонов Р. Г., Михеев Г. М., Образцов А. Н. Датчик пространственного положения из нанографитной пленки // Тонкие пленки в оптике и наноэлектронике: Тр. Харьковской нанотехнологической ассамблеи. 2006. Т. 2. С. 352—356.
11. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.

12. Павловский И. Ю., Образцов А. Н. Автоматизированная установка для газофазного осаждения алмазных пленок в разряде постоянного тока // ПТЭ. 1998. № 1. С. 152—156.
13. Образцов А. Н., Павловский И. Ю., Волков А. П. Автоэлектронная эмиссия в графитоподобных пленках // ЖТФ. 2001. Т. 71. С. 89—95.

Сведения об авторах

- Геннадий Михайлович Михеев** — д-р физ.-мат. наук; Институт прикладной механики, Уральское отделение РАН, Ижевск; E-mail: mikheev@udman.ru
- Руслан Геннадьевич Зонов** — канд. физ.-мат. наук; Институт прикладной механики, Уральское отделение РАН, Ижевск; E-mail: ZNV@udman.ru
- Александр Николаевич Образцов** — д-р физ.-мат. наук, профессор; Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, кафедра кристаллографии; E-mail: obraz@polly.phys.msu.ru
- Василий Михайлович Стянин** — Институт прикладной механики, Уральское отделение РАН, Ижевск; лаборант

Рекомендована
Институтом прикладной механики
УрО РАН

Поступила в редакцию
17.10.07 г.