

УДК 541(64+24):543.422.4

ФОТОРЕФРАКТИВНЫЕ КОМПОЗИТЫ БЛИЖНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ ПОЛИВИНИЛКАРБАЗОЛА, МНОГОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК И ФУЛЛЕРЕНА C_{60}^1

© 2008 г. А. Д. Гришина*, L. Licea-Jiménez**, ***, Л. Я. Перешикво*,
Т. В. Кривенко*, В. В. Савельев*, R. W. Rychwalski**, А. В. Ванников*

*Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук
119991 Москва, Ленинский пр., 31

**Department of Materials Science and Engineering, Chalmers University of Technology
SE-41296 Göteborg, Sweden

***Centro de Investigación en Materiales Avanzados,
A.C. Miguel de Cervantes 120 Complejo Industrial, Chihuahua
31109 Chihuahua, Chih, Mexico

Поступила в редакцию 30.05.2007 г.
Принята в печать 23.10.2007 г.

Изучены фоторефрактивные характеристики при 1064 нм композитов из поливинилкарбазола и многостенных углеродных нанотрубок в отсутствие и в присутствии фуллерена C_{60} . Установлено, что введение фуллераена C_{60} обеспечивает увеличение коэффициента двулучевого усиления лазерного луча и сокращение времени записи голограммы. Предварительное освещение слоя, содержащего фуллерен, непрерывным светом Не–Не-лазера (633 нм) приводит к дополнительному увеличению коэффициента двулучевого усиления.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе рассмотрены фоторефрактивные характеристики на длине волн 1064 нм слоев из поливинилкарбазола (ПВК), содержащих многостенные углеродные нанотрубки (МУНТ) в отсутствие или в присутствии фуллераена C_{60} . Заметное внимание удалено эффектам предварительного освещения (предосвещения) слоя непрерывным светом Не–Не-лазера (633 нм).

Серьезное внимание к фоторефрактивным материалам ИК-диапазона связано с их перспективой использования в медицинской диагностике живых организмов. Как известно, живые ткани пропускают свет ближнего ИК-диапазона, их прозрачность возрастает с увеличением длины волны проникающего света. В работах [1, 2] предлагается для просвечивания тканей применить излучение 1064 нм Nd:YAG-лазера, а для коррекции и усиления изображения использовать

фоторефрактивные многослойные структуры на основе квантовых ям InGaAs/GaAs. Эти структуры получают по чрезвычайно сложной технологии, и актуальной задачей является разработка простых в изготовлении полимерных композитов, имеющих фоторефрактивную чувствительность при 1064 нм.

Ранее было показано, что полимеры (полимиид и ПВК), допированные одностенными углеродными нанотрубками, обладают фоторефрактивной чувствительностью при 1064 и 1550 нм [3–5]. При измерении фоторефрактивного эффекта при длине волны 1550 нм было обнаружено, что введение фуллераена C_{60} в состав композитов и предварительное освещение образцов непрерывным Не–Не-лазером (633 нм) обеспечивают четырехкратное увеличение коэффициента двулучевого усиления. Ниже в композите из ПВК и МУНТ эффекты предосвещения рассмотрены более подробно.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Измерены оптические спектры, фото- и темновой ток, фоторефрактивное двулучевое усиление

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 07-03-13547 и 08-03-00125), Международного научно-технического центра (грант 3718).

E-mail: van@elchem.ac.ru (Ванников Анатолий Вениаминович).

ние сигнального лазерного луча, дифракционная эффективность в слоях ПВК, содержащих 0.43 мас. % МУНТ (“Sun Nanotech”, Китай), в отсутствие или в присутствии 1.2–3.0 мас. % C_{60} . При получении полимерных композитов сначала диспергировали МУНТ в тетрахлорэтане в течение 30 мин, используя ультразвуковой диспергатор УЗДН-А. Затем добавляли раствор ПВК (“Aldrich”) или ПВК + C_{60} в тетрахлорэтане, смешивали и вязкую смесь вновь подвергали ультразвуковой обработке в течение 15 мин. Сразу после этого раствор поливали на подложку. Оптические спектры записывали на спектрофотометре “Shimadzu UV-3101PC” в полимерных слоях, нанесенных на кварцевое стекло. Для анализа электрических или фоторефрактивных характеристик раствор поливали на поверхность прозрачного электрода из ITO, покрытого пленкой из Al_2O_3 , затем растворитель испаряли при повышенной температуре (около 60°C) с целью сокращения времени формирования твердого полимерного слоя. Фототок измеряли в ячейке типа сандвич: прозрачный электрод из ITO– Al_2O_3 –полимерный композит–электрод из Ag (паста коллоидального серебра, диаметр около 2 мм). Для изучения фоторефрактивных характеристик использовали ячейку строения ITO– Al_2O_3 –полимерный композит– Al_2O_3 –ITO. Напыленная пленка Al_2O_3 толщиной несколько нанометров обеспечивала снижение темнового тока, обусловленного инжекцией дырок из ITO в слой.

Для исследования фоторефрактивных характеристик применяли голографическую установку с использованием линейно поляризованного излучения Nd:YAG-лазера (1064 нм). Лазерный луч разделялся на два луча равной интенсивности, которые с помощью зеркал совмещались на измерительной ячейке. Лучи пересекались в полимерном слое под углом $2\theta = 15^\circ$. Наклон биссектрисы этого угла к поверхности ячейки составлял $\phi = 45^\circ$. Диаметр области пересечения лучей около 5 мм. В области пересечения лучей возникала интерференция, период интерференционной решетки $\Lambda = \lambda/(2n \sin \theta) = 2.55$ мкм при $\lambda = 1064$ нм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Обязательными компонентами фоторефрактивного композита являются фотосенсибилизи-

тор, нелинейные оптические хромофоры и транспортные центры. Фоторефрактивный эффект включает следующие основные процессы: фотогенерацию электрон-дырочных пар в области ярких интерференционных полос, их разделение и транспорт под воздействием приложенного постоянного электрического поля E_0 , а также последующий захват на ловушках, обеспечивающий формирование пространственно разделенных захваченных зарядов разных знаков и возникновение между ними периодического поля пространственного заряда E_{sc} . Поляризация нелинейных оптических хромофоров в периодическом суммарном поле $E_{tot} = E_{sc} + E_0$ вызывает модуляцию показателя преломления Δn , т.е. образование фазовой голограммы (дифракционной решетки в случае лучей с плоским волновым фронтом). В работе использованы композиты на основе полимера с высокой температурой стеклования (ПВК, $T_g = 200^\circ C$), в котором жестко закрепляется хаотическое распределение нелинейных оптических хромофоров, полученное при поливе слоев из раствора. Поскольку в этих условиях только восприимчивость третьего порядка $\chi^{(3)}$ имеет ненулевое значение, необходимо применять протяженные нелинейные оптические хромофоры (например, углеродные нанотрубки), так как молекулярная поляризуемость γ мала в случае небольших молекул, но растет с увеличением длины хромофора l пропорционально $l^{2.4}$ и достигает значительных величин. Амплитуда периодической модуляции показателя преломления дается соотношением

$$\Delta n = (2\pi/n)\chi^{(3)}(E_{tot})^2, \quad (1)$$

где $\chi^{(3)} = Nf^4\gamma/5$ – электрическая восприимчивость третьего порядка, $f = (n^2 + 2)/3$ – корреляционный фактор (для ПВК $n = 1.5$).

Фоторефрактивный эффект возникает только в случае различного смещения зарядов противоположных знаков от места их фотогенерации. Амплитуда поля E_{sc} и, следовательно, дифракционная решетка оказываются пространственно смещенными на расстояние Δx или на фазу $\psi = 2\pi\Delta x/\Lambda$ относительно интерференционной решетки. В настоящей работе выполняются условия, при которых вследствие фазового сдвига ψ отраженная от дифракционной решетки часть лу-

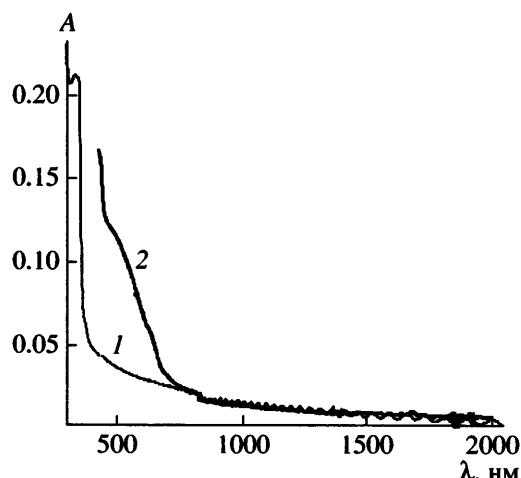


Рис. 1. Оптические спектры композита ПВК–0.43 мас. % МУНТ (1) и композита, дополнительно содержащего 3 мас. % C_{60} (2).

ча 1 совпадает по фазе и направлению с проходящим лучом 2 (сигнальным лучом), который распространяется от интерференционной полосы к дифракционной решетке, и их конструктивная интерференция приводит к увеличению интенсивности луча 2. Отраженная часть луча 2 совпадает по направлению с лучом 1, но противоположна ему по фазе, что обуславливает их деструктивную интерференцию и снижение интенсивности луча 1 (накачивающего луча). Достаточно поменять направление поля E_0 , и соответствующая перемена направления дрейфа зарядов обеспечит изменение знака фазового сдвига. В этих условиях усилива-

ется луч 1, а луч 2 погашается. В настоящей работе использовали геометрию, при которой усиливался луч 2 и погашался луч 1 при отрицательном потенциале на электроде на выходе лучей из слоя (на выходном электроде), и луч 2 погашался, а луч 1 усиливался при положительном потенциале на выходном электроде.

На рис. 1 представлены оптические спектры композита из ПВК и 0.43 мас. % МУНТ и композита, дополнительно содержащего 3 мас. % C_{60} . Как видно, фуллерен C_{60} не дает заметного вклада в оптическое поглощение A при длине волны 1064 нм. Измерения $A(1064)$ в полимерных слоях разной толщины d позволили надежно определить коэффициент оптического поглощения $\alpha = 2.3A(1064)/d = 18 \text{ см}^{-1}$ в композитах из ПВК и 0.43 мас. % МУНТ.

При определении фототока сначала измеряли темновой ток j_d , затем включали освещение образца лучом Nd:YAG-лазера непрерывного действия (интенсивность $I_0 = 4.6 \text{ Вт}/\text{см}^2$) со стороны прозрачного электрода изITO и измеряли суммарный ток $j = j_d + j_{ph}$. Фототок оценивали по разности $j_{ph} = j - j_d$ после достижения стационарного значения суммарного тока. Полевая зависимость фототока для слоя ПВК–0.43 мас. % МУНТ, а также слоя, дополнительно содержащего 3 мас. % C_{60} , приведена на рис. 2а. Видно, что присутствие C_{60} не влияет на фототок. На рис. 2б представлена полевая зависимость квантовой эффективно-

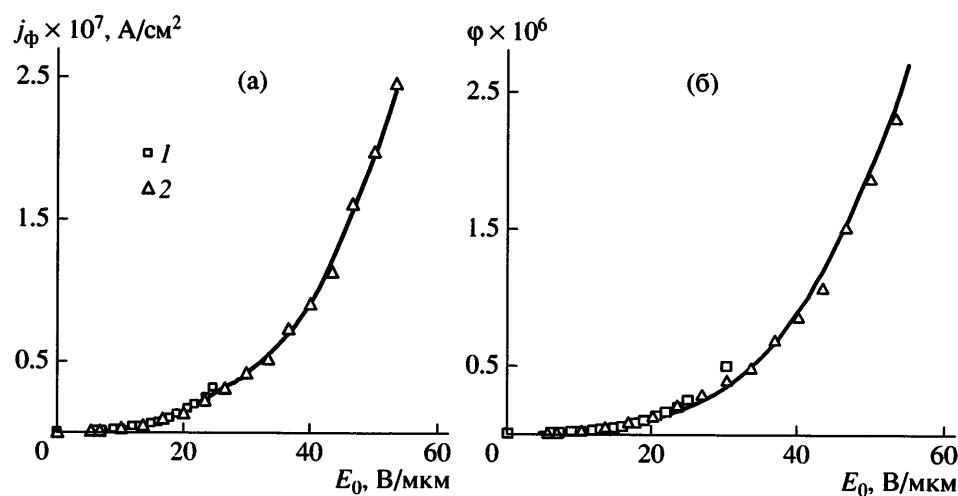


Рис. 2. Полевые зависимости фототока (а) и квантовой эффективности образования подвижных носителей заряда (б) в слоях ПВК–0.43 мас. % МУНТ (1), а также ПВК–0.43 мас. % МУНТ–3 мас. % C_{60} (2). Толщина слоя 17 мкм.

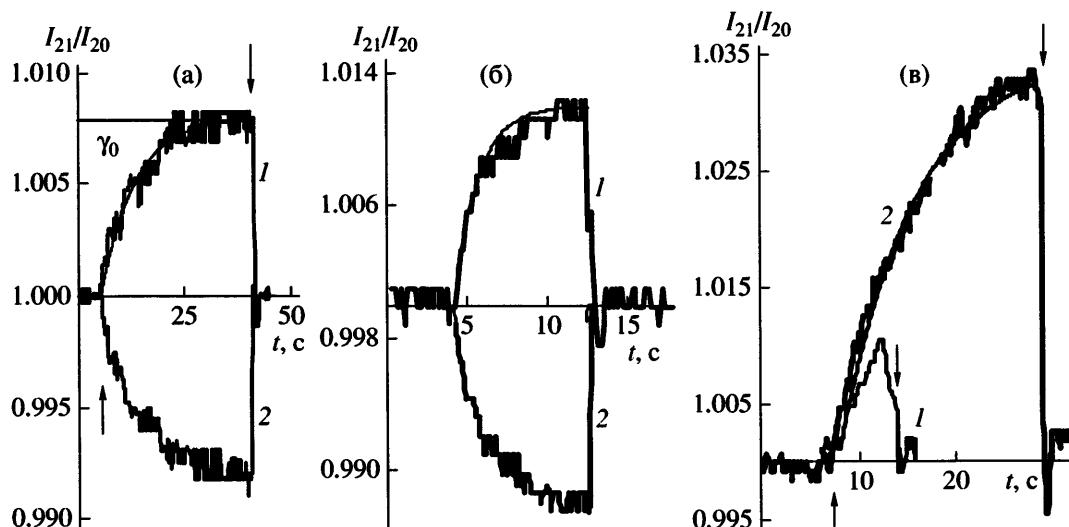


Рис. 3. Изменение интенсивности луча 2 при включении луча 1, измеренное в слоях ПВК–0.43 мас. % МУНТ (а), ПВК–0.43 мас. % МУНТ–2 мас. % C_{60} (б), ПВК–0.43 мас. % МУНТ–3 мас. % C_{60} (в). Стрелки вверх–вниз соответствуют включению–выключению луча 1. а, б – Кривые 1 и 2 измерены при отрицательном и положительном потенциале на выходном электроде соответственно; в – кривые 1 и 2 измерены до и после предосвещения в течение 6 мин соответственно. Толщина слоев 15 мкм, $E_0 = 66$ В/мкм.

сти образования подвижных носителей заряда, оцененная по полевой зависимости фототока $j_{ph}(E_0)$ по формуле

$$\Phi(E_0) = j_{ph}(E_0)hc/\lambda e \{ I_0(1 - \exp[-\alpha(1064)d]) \}, \quad (2)$$

где $\{I_0(1 - \exp[-\alpha(1064)d])\}$ – поглощенная в слое энергия света, $hc/\lambda = 1.165$ эВ – энергия кванта света при длине волны 1064 нм, e – заряд электрона. На рис. 2б сплошная кривая соответствует приведенному в работе [6] решению уравнения Онзагера $\Phi(E_0) = P(r_0, E_0)\Phi_0$ в виде степенной зависимости $\Phi \sim (E_0)^4$. Здесь Φ_0 – квантовый выход термализованных электрон–дырочных пар с начальным радиусом разделения r_0 , $P(r_0, E_0)$ – вероятность того, что при начальном радиусе разделения r_0 заряды избегают рекомбинации. Экспериментальные полевые зависимости квантовой эффективности, оцененные по формуле (2), хорошо аппроксимируются уравнением Онзагера при $\Phi_0 = 0.8$ и $r_0 = 9.8$ Å.

Оптическая нелинейность третьего порядка подробно исследована в ряде композитов, содержащих МУНТ, в частности, в композитах на основе поли[2-метокси-5-октиокси]-*p*-фениленвинилена [7]. Восприимчивость $\chi^{(3)}$ оценена при 1064 нм по разности между восприимчивостями композита и полимера без добавок. За вычетом

вклада от термического эффекта оценено, что электронная восприимчивость третьего порядка, обусловленная наличием 3.75 мас. % МУНТ, составляет $\chi^{(3)} = 3.58 \times 10^{-11}$ см³/эрг. (При содержании 0.43 мас. % МУНТ это соответствует восприимчивости 0.41×10^{-11} см³/эрг.)

Наличие фотоэлектрической чувствительности при 1064 нм в композитах ПВК–МУНТ и нелинейных оптических свойств МУНТ позволяет предполагать, что эти композиты обладают также фоторефрактивной чувствительностью на длине волны 1064 нм.

Кинетические кривые двулучевого взаимодействия были измерены в композитах из ПВК и 0.43 мас. % МУНТ в отсутствие добавок и в присутствии 1.2–3 мас. % C_{60} . На рис. 3 представлены кинетические кривые, измеренные в слое из ПВК и МУНТ (рис. 3а), а также слоях, дополнительно содержащих 2 (рис. 3б) и 3 мас. % C_{60} (рис. 3в). Кривые измерены при равной интенсивности падающих на слой лучей $I_1(0) = I_2(0) = 0.14$ Вт/см² и напряженности поля $E_0 = 66$ В/мкм при такой последовательности операций: сначала включали луч 2 и измеряли его интенсивность на выходе из ячейки I_{20} ; затем в момент $t = 0$ прикладывали отрицательный потенциал к выходному электроду, интенсивность луча 2 при этом не изменялась, через определенный промежуток времени включали

ли луч 1 и затем выключали. Как видно на рис. 3, после включения луча 1 (стрелка вверх) интенсивность луча 2 I_{21} нарастала, а после выключения луча 1 (стрелка вниз) принимала исходное значение I_{20} . Относительное возрастание интенсивности луча 2 во времени после включения луча 1 может быть аппроксимировано зависимостью (плавные кривые на рис. 3)

$$I_{21}/I_{20} = 1 + (\gamma_0 - 1)\{1 - \exp[-(t - t_0)/\tau]\} \quad (3)$$

Здесь γ_0 – фактор усиления, т.е. отношение интенсивностей I_{21}/I_{20} в условиях, когда I_{21} достигает насыщения; τ – постоянная времени формирования решетки или время отклика композита на двулучевое воздействие. Коэффициент двулучевого усиления Γ связан с фактором усиления зависимостью

$$\Gamma L = \ln[\gamma_0/(2 - \gamma_0)] \quad (4)$$

($L = d/\cos(\phi - \theta)$ – оптический путь луча 2 в слое) и определяется максимальной модуляцией показателя преломления Δn и фазовым сдвигом ψ

$$\Gamma = 4\pi\Delta n \cos 2\theta \sin \psi / \lambda \quad (5)$$

На рис. 3а и 3б показано, как погашается луч 2 – снижается отношение I_{21}/I_{20} (кривые 2), когда к выходному электродру приложен положительный потенциал. Снижение I_{21}/I_{20} (кривые 2) имеет вид

$$I_{21}/I_{20} = 1 - (\gamma_0 - 1)\{1 - \exp[-(t - t_0)/\tau]\},$$

полностью асимметричный зависимости (3), т.е. совпадает с кривой 1 по параметрам γ_0 и τ . При концентрации C_{60} 3 мас. % параметры γ_0 и τ искажены: на рис. 3в (кривая 1) показано, что при включении луча 1 отношение I_{21}/I_{20} сначала растет, достигает максимума и затем начинает убывать. Установлено, что это связано с накоплением объемного заряда в приэлектродном пространстве при прохождении темнового тока, приводящем к снижению E_0 в ходе измерения кинетической кривой.

На рис. 4 представлена измеренная при $E_0 = 66$ В/мкм зависимость фактора усиления γ_0 и времени отклика τ от содержания C_{60} . Видно, что композит из ПВК и 0.43 мас. % МУНТ в отсутствие фуллерена характеризуется фактором усиления $\gamma_0 = 1.008$ и временем отклика $\tau = 8$ с; при

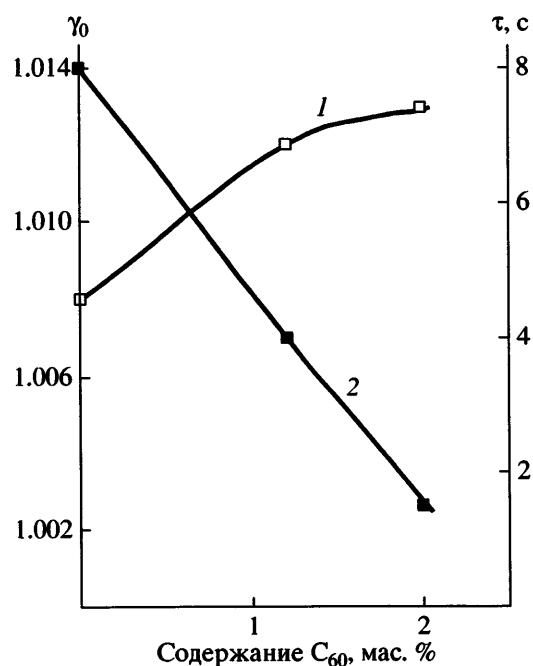


Рис. 4. Зависимость фактора усиления γ_0 (1) и времени отклика τ (2) от содержания C_{60} в композите ПВК-0.43 мас. % МУНТ. Толщина слоя 15 мкм, $E_0 = 66$ В/мкм.

введении 2 мас. % C_{60} γ_0 увеличивается до 1.013 и время отклика τ сокращается до 1.2 с. Эти изменения могут быть связаны с протеканием следующих процессов. Скорость формирования дифракционной решетки $\partial\Delta n/\partial t$ ($\sim 1/\tau$) определяется соотношением

$$\begin{aligned} \partial\Delta n/\partial t &\sim \partial E_{sc}/\partial t \sim \partial N_c/\partial t \sim \\ &\sim [\Phi I_0 (1 - 10^{-A(1064)}) \lambda e/hc] - N_c/t_c, \end{aligned} \quad (6)$$

где N_c – количество зарядов, захваченных в ловушках и формирующих поле пространственного заряда E_{sc} , t_c – время их пребывания в ловушках. Взаимное положение энергетических уровней компонентов слоя показано на рис. 5. Работа выхода с очищенной от следов кислорода поверхности МУНТ равна 4.3 эВ [8]. Поскольку мы очищали МУНТ от примеси катализатора обработкой в кислоте (с последующим многократным отмыванием в воде) [4], возможное формирование карбоксильных групп на поверхности трубок могло увеличить работу выхода до 5.1 эВ [8]. Как показано на рис. 5, в композитах, содержащих C_{60} , при фотовозбуждении МУНТ лазером с длиной

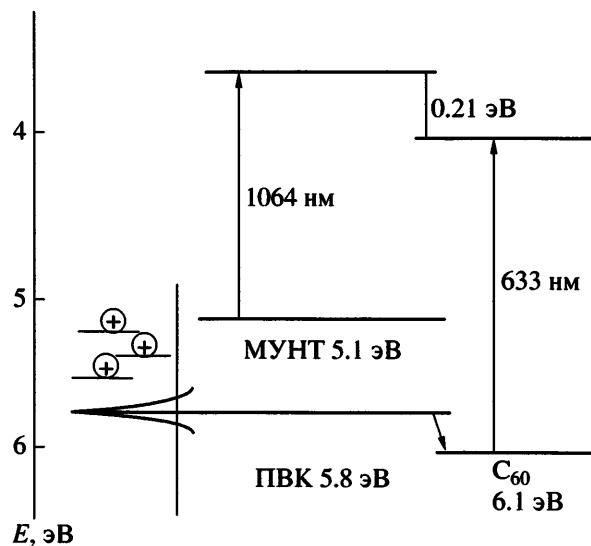
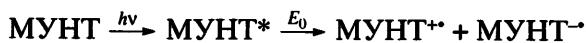


Рис. 5. Взаимное положение энергетических уровней в композите из ПВК-МУНТ- C_{60} .

волны 1064 нм происходит образование, разделение зарядов в поле E_0



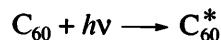
и последующий транспорт дырок МУНТ⁺ + МУНТ $\xrightarrow{E_0}$ МУНТ + МУНТ⁺ и электронов МУНТ + МУНТ⁻ $\xrightarrow{E_0}$ МУНТ⁻ + МУНТ. Далее может следовать энергетически выгодный захват электронов молекулами фуллерена: МУНТ⁻ + + C_{60} \longrightarrow МУНТ + C_{60}^- . Этот захват приводит к увеличению времени t_c пребывания в ловушках захваченных зарядов и, в соответствии с формулой (6), к повышению скорости формирования дифракционной решетки $\partial\Delta n/\partial t$ ($\sim 1/t$). При введении C_{60} возрастает также и фактор усиления γ_0 , так как в условиях насыщения (когда $\partial\Delta n/\partial t = 0$) из-за увеличения времени жизни t_c повышается концентрация зарядов, захваченных в ловушках, N_c , поэтому возрастает E_{sc} и, следовательно, Δn при насыщении.

На рис. 3в (кривая 2) видно более чем трехкратное увеличение фактора усиления в образце, содержащем 3 мас. % C_{60} , в том случае, когда перед измерением кинетической кривой образец был освещен непрерывным Не : Не-лазером (633 нм, 0.2 Вт/см²) в течение 6 мин в отсутствие поля E_0 . Влияние предосвещения на фоторефрактивные характеристики полимерных композитов

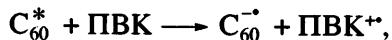
видимого и ближнего ИК-диапазонов (830 нм) исследовалось ранее [9–11]. Было показано, что основным эффектом предосвещения является увеличение скорости формирования дифракционной решетки, обусловленное тем, что при измерении фоторефрактивной кинетической кривой преобладает перераспределение зарядов, которые образуются в ходе предосвещения.

В нашей работе [5] по исследованию фоторефрактивного эффекта при 1550 нм в ПВК, содержащем одностенные углеродные нанотрубки и C_{60} , было установлено, что предосвещение при 633 нм обеспечивает рост коэффициента двулучевого усиления Γ , оцениваемого по формуле (4).

Предосвещение образцов из ПВК, МУНТ и C_{60} также приводит к увеличению коэффициента двулучевого усиления. Как уже отмечалось, в композите, содержащем 3 мас. % C_{60} , шестиминутное предосвещение обеспечивает повышение γ_0 более чем в 3 раза (рис. 3в, кривая 2). Показанное на рис. 5 взаимное положение энергетических уровней является основанием для заключения, что при фотовозбуждении фуллерена в ходе предосвещения



протекает энергетически выгодный процесс



обеспечивающий появление дырок в ПВК. Можно предположить, что дырки заполняют глубокие ловушки (концевые группы ПВК, карбазолильные димеры и т.д.) и ограничивают их влияние на транспорт дырок, генерированных в МУНТ в условиях записи голограммы.

Чтобы определить факторы, приводящие к увеличению коэффициента Γ в результате предосвещения, в композитах из ПВК, 0.43 мас. % МУНТ и 2 мас. % C_{60} были измерены дифракционная эффективность η

$$\eta = \sin^2(\Delta n \pi d \cos 2\theta) / \{\lambda [\cos(\phi - \theta) \cos(\phi + \theta)]\}^{0.5} \quad (7)$$

и коэффициент двулучевого усиления Γ до и сразу после предосвещения. При измерении дифракционной эффективности решетка записывалась двумя лучами с длиной волны 1064 нм, а в каче-

Влияние предосвещения на основные фоторефрактивные характеристики композита из ПВК, 0.43 мас. % МУНТ и 2 мас. % C_{60} ($E_0 = 83.3$ В/мкм, толщина образца 12 мкм)

Время предосвещения, мин	η	$\Gamma, \text{см}^{-1}$	Δn	$\sin \psi$	$\psi, \text{град}$
0	0.007	12.2	0.0026	0.042	2.34
2	0.01	20.4	0.0031	0.057	3.25

стве считающего был использован третий луч с длиной волны 633 нм, излучаемый Не–Не-лазером. Этот луч пересекал образец параллельно лучу 1. С целью ослабления воздействия на композит его интенсивность была снижена до $I_3 = 0.02$ мВт/см². При измерении дифракционной эффективности сначала включали луч 3, затем записывающие лучи. Включение и последующее выключение поля $E_0 = 83.3$ В/мкм (толщина образца 12 мкм) приводило соответственно к снижению интенсивности I_3 до стационарного значения I_{3E} и последующему возвращению к исходной величине I_{30} . В таблице приведены измеренные до и после предосвещения дифракционная эффективность $\eta = (I_{30} - I_{3E})/I_{30}$ и коэффициент Γ , а также рассчитанная по формуле (7) модуляция показа-

теля преломления Δn и фазовый сдвиг ψ , оцененный подстановкой Δn в формулу (5). Данные, приведенные в таблице, показывают, что увеличение коэффициента Γ почти в 1.7 раза в результате предосвещения в течение 2 мин, обеспечивающее частичное заполнение глубоких дырочных ловушек, обусловлено возрастанием Δn на 20% и фазового сдвига ψ почти в 1.4 раза.

На рис. 6 приведены полевые зависимости коэффициента двулучевого усиления, оцененного по формуле (4) при измерении фактора усиления γ_0 в композитах из ПВК, МУНТ и 2 мас. % C_{60} без предосвещения и с предосвещением в течение 5 мин. Как видно, пятиминутное предосвещение обуславливает двукратное увеличение коэффициента двулучевого усиления в широком диапазоне напряженностей приложенного поля E_0 .

Таким образом, в настоящей работе показано, что композиты из ПВК и МУНТ обладают фотоэлектрической и фоторефрактивной чувствительностью при 1064 нм. Изучение фоторефрактивных характеристик в отсутствие и в присутствии фуллерена C_{60} , а также в условиях предосвещения позволило высказать предположение, что в ПВК присутствуют ловушки для дырок, фотогенерированных в МУНТ в условиях записи фазовой голограммы. Заполнение этих ловушек в результате предосвещения приводит к увеличению модуляции показателя преломления и фазового сдвига, что, согласно формуле (5), обеспечивает рост коэффициента двулучевого усиления.

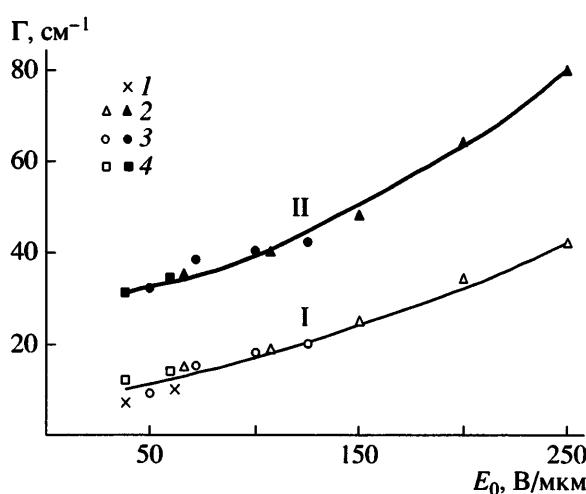


Рис. 6. Полевые зависимости коэффициента двулучевого усиления, измеренные без предосвещения (I) и после предосвещения в течение 5 мин (II). Толщина слоя 20 (1), 6 (2), 12 (3) и 17 мкм (4); содержание C_{60} 1.2 (1) и 2 мас. % (2–4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yu P., Turek J.J., French P.M.W., Melloch M.R., Nolte D.D. // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 83. № 3. P. 575.
2. Yu P., Balasubramanian S., Ward T.Z., Chandrasekhar M., Chandrasekhar H.R. // Synth. Met. 2005. V. 155. № 2. P. 406.
3. Ваников А.В., Rychwalski R.W., Гришина А.Д., Перешикко Л.Я., Кривенко Т.В., Савельев В.В., Золотаревский В.И. // Оптика и спектроскопия. 2005. Т. 99. № 4. С. 672.
4. Licea-Jimenes L., Grishina A.D., Pereshivko L.Ya., Krivenko T.V., Savelyev V.V., Rychwalski R.W., Vannikov A.V. // Carbon. 2006. V. 44. № 1. P. 113.
5. Гришина А.Д., Перешикко Л.Я., Licea-Jimenes L., Кривенко Т.В., Савельев В.В., Rychwalski R.W.,

- Ванников А.В. // Химия высоких энергий. 2007. Т. 41. № 4. С. 311.*
6. *Mozumder A. // J. Chem. Phys. 1974. V. 60. № 11. P. 4300.*
7. *Yi W., Feng W., Zhang Ch., Long Y., Zhang Zh. // J. Appl. Phys. 2006. V. 100. № 9. P. 094301.*
8. *Ago H., Kugler T., Cacialli F., Salaneck W.R., Shaffer M.S.P., Windle A.H., Friend R.H. // J. Phys. Chem. 1999. V. 103. № 38. P. 8116.*
9. *Grunnet-Jepsen A., Wright D., Smith B., Bratcher M.S., DeClue M.S., Siegel J.S., Moerner W.E. // Chem. Phys. Lett. 1998. V. 291. № 5. P. 553.*
10. *Mecher E., Gallego-Gomez F., Tillmann H., Hörhold H.-H., Hummelen J.C., Meerholz K. // Nature. 2002. V. 418. № 6901. P. 959.*
11. *Ostroverkhova O., Moerner W.E. // Chem. Rev. 2004. V. 104. № 7. P. 3267.*

Near-Infrared Range Photorefractive Composites Based on Poly(vinylcarbazole), Multiwall Carbon Nanotubes, and Fullerene C₆₀

A. D. Grishina^a, L. Licea-Jiménes^{b,c}, L. Ya. Pereshivko^a, T. V. Krivenko^a, V. V. Savel'ev^a, R. W. Rychwalski^b, and A. V. Vannikov^a

^a *Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Russian Academy of Sciences, Leninskii pr. 31, Moscow, 119991 Russia*

^b *Department of Materials Science and Engineering, Chalmers University of Technology, SE-41296 Göteborg, Sweden*

^c *Centro de Investigaciyn en Materiales Avanzados, A.C. Miguel de Cervantes 120 Complejo Industrial, Chihuahua 31109 Chihuahua, Chih, Mexico
e-mail: van@elchem.ac.ru*

Abstract—For composites based on poly(vinylcarbazole) and multiwall carbon nanotubes, photorefractive characteristics at 1064 nm have been studied in the presence and absence of fullerene C₆₀. It has been found that the introduction of fullerene C₆₀ provides an increase in the two-beam gain coefficient of a laser beam and a reduction in the time of hologram recording. The preillumination of the fullerene-containing layer with a continuous light from a He–Ne laser (633 nm) leads to an additional increase in the two-beam gain coefficient.