

УДК 519.17

ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЯДЕРНОГО И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ АДРОНОВ НА ПУЧКЕ УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 2 ГЭВ

Г. А. Сокол¹, Е. М. Лейкин²

Приведено обоснование организации в г. Троицке Центра электромагнитных исследований на базе ускорителя электронов, создаваемого на основе криогенных ВЧ-структур, с энергией 2 ГэВ и непрерывным во времени высокоинтенсивным пучком электронов. Обсуждается получение меченых по энергии короткоживущих мезонов. Основное направление исследований – изучение влияния ядерной среды на характеристики адронов.

Ключевые слова: ядерное и электромагнитное взаимодействия, ускорители электронов, криогенные ВЧ-структуры, влияние ядерной среды на характеристики мезонов.



Владимир Иосифович ВЕКСЛЕР (1907–1966) – действительный член АН СССР, автор принципа «автофазировки», позволившего осуществить ускорение релятивистских частиц, лауреат Международной премии «АТОМ для МИРА» (вместе с Э. Макмилланом), лауреат Ленинской и Государственных премий, основатель Эталонной лаборатории ФИАН, руководитель фундаментальных исследований по физике ядра и частиц на созданных им ускорителях электронов с энергиями 30, 280, 600, 1300 МэВ (ФИАН) и на ускорителе протонов (синхрофазотроне) с энергией 10 ГэВ (ОИЯИ г. Дубна)

¹ Учреждение Российской академии наук Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: gsokol@venus.lpi.troitsk.ru.

² Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ, e-mail: leikin@sinp.msu.ru.

Одним из основных направлений фундаментальных исследований, проводившихся в ФИАНе, начиная с 40-х годов, было изучение электромагнитных процессов на базе 4-х поколений электронных синхротронов, область энергий которых простиралась от 30 до 1300 МэВ. Эти исследования были инициированы В.И. Векслером и их результаты внесли существенный вклад в формирование современных представлений о механизме ядерных реакций и свойствах фундаментальных частиц.

В настоящей статье рассматриваются перспективы традиционных для ФИАН исследований электромагнитных процессов в области энергии 2 ГэВ. Одно из фундаментальных направлений этих исследований связано с выяснением влияния ядерной среды на характеристики (массу, время жизни и др.) адронов, что непосредственно затрагивает проблему механизма возникновения массы адронов – одну из центральных проблем современной теории сильных взаимодействий.

Важным явлением физики сильных взаимодействий является динамическое нарушение киральной симметрии, которое в рамках квантовой хромодинамики (КХД) связано с конденсацией кварк–антикварковых пар в КХД вакууме, аналогичной конденсации куперовских пар в теории сверхпроводимости. Предполагается, что с ростом температуры и плотности среды в КХД вакууме возможен переход в состояние с киральной симметрией. Более того, частичное восстановление киральной симметрии возможно уже в условиях, характерных для внутриядерной среды.

Киральная симметрия относится к скрытым симметриям. По существу она включает в себя операции внутренней симметрии, которые могут переводить u -кварк в d -кварк и наоборот, но при этом действуют независимо на кварки с левой и правой спиральностью (имеется в виду, что их спины ориентированы против или по направлению движения кварка – отсюда и термин “спиральность” или “киральность” (по-гречески – рукоподобный). Если бы киральная симметрия была явной, это означало бы, что частицы с правой и левой спиральностью никогда не могли бы взаимодействовать друг с другом (из статьи К. Льюэлли-Смита, Фундаментальная структура материи, из-во “Мир”, 1984, стр. 97).

Как известно, в отличие от масс атомов, молекул и ядер, массы адронов возникают динамически и связаны со спонтанным нарушением киральной симметрии. Частичное восстановление киральной симметрии во внутриядерной среде может проявляться в виде модификации свойств адронов.

Интерес к исследованиям электромагнитных взаимодействий в последнее время возник в связи с отмеченными в целом ряде работ определенными преимуществами изу-

чения структуры частиц и ядер с помощью пучков электронов и гамма-квантов по сравнению с исследованиями на пучках нуклонов и ядер. При соударениях ультрарелятивистских пучков тяжелых ионов достигаются состояния ядерной материи с высокой плотностью и температурой. Однако динамика происходящих процессов представляет собой сложную картину превращения ядерного вещества в различных стадиях (предравновесной, равновесной, постравновесной), с различной плотностью и температурой, и в различных состояниях ядерной материи (адронной, кварк-глюонной с последующей адронизацией). Все эти стадии требуют детального описания (неизбежно модельно-зависимого) всей сложной динамики, включая гидродинамические подходы [1].

Преимущество использования для изучения структуры частиц и ядер, а также поведения частиц в ядерной среде пучков электронов и гамма-квантов обусловлено стационарным состоянием ядра, а также возможностью исследовать воздействие ядерной материи на характеристики конкретных частиц.

Пучкам электронов и гамма-квантов присущи следующие особенности:

- точность взаимодействия – размеры электрона оцениваются на уровне 10^{-16} см, что на много порядков меньше размера нуклона (10^{-13} см);
- взаимодействие электронов и гамма-квантов с частицами носит электромагнитный характер и хорошо описывается законами современной электродинамики;
- электромагнитное взаимодействие сравнительно слабо возмущает объект исследования, что позволяет получать достоверные данные о его структуре.

В мире в настоящее время существует несколько ускорителей электронов в Гэв-ой области энергии пучка. К ним можно отнести ускоритель в г. Майнц (Германия) – МАМІ – С с энергией $E_e = 1500$ МэВ, ускоритель-накопитель с $E_e = 3$ ГэВ в г. Бонн (Германия), ускоритель с энергией $E_e = 250$ МэВ (планируется увеличение энергии) в г. Лунд (Швеция) и ускоритель в г. Гренобль (Франция) с энергией фотонного пучка $E_\gamma = 0.6$ ГэВ, полученного при использовании обратного комптон-эффекта. К этому перечню следует отнести и ускоритель СЕБАФ (США) с энергией $E_e = 6$ ГэВ.

На этих ускорителях проводится широкий спектр исследований структур атомных ядер и элементарных частиц, изучение влияния ядерной среды на характеристики частиц и кварков, исследования по поляризации рождающихся в реакциях частиц, по фото- и электророждению мезонов, по изучению ядерного взаимодействия мезонов.

К сожалению, в России, начиная с 80-х годов, практически не рассматривались вопросы создания новых ускорителей электронов. Существующий в РАН, в г. Троицке

ускоритель электронов “ПАХРА” был создан в 70-е годы и к настоящему времени он практически исчерпал свои ресурсы.

Попытки определить влияния ядерной материи на характеристики адронов предпринимались на зарубежных ускорителях неоднократно, однако существующие к настоящему времени данные крайне противоречивы [3].

По нашему мнению, для получения достоверных и надежных результатов крайне желательно выполнение следующих условий:

– использование энергии частиц пучка и кинематики эксперимента, соответствующих безотдачной кинематике для рождающихся мезонов с тем, чтобы мезон значительную часть своего времени жизни находился внутри ядра;

– предпочтителен выбор мишени, содержащей помимо исследуемого ядра A также ядра водорода H (типа H_2O , CH_2 , C_3H_8). В этом случае суммарный спектр, возникающий на такой мишени, будет содержать узкий пик, отвечающий рождению мезона на водороде и широкий пик, отвечающий рождению на нуклоне в ядре A и смещенный относительно рождения на H (см. рис. 1 в [2]).

В настоящее время при сооружении ускорителей электронов широко используются криогенные ускоряющие высокочастотные (ВЧ) структуры, что обеспечивает получение практически непрерывного во времени пучка, высокую степень монохроматичности и малую пространственную расходимость пучка. Примером ускорителя электронов, при сооружении которого использовались высокочастотные (ВЧ) структуры, может служить ускорительный комплекс СЕБАФ (США). Он был построен в 80-е годы с использованием ВЧ-структур с ускорением $\Delta E = 5$ МэВ/м. Общая длина комплекса достигала более 100 м. В настоящее время существуют разработки ВЧ-структур с $\Delta E = 50$ МэВ/м. Применение ВЧ-структур с $\Delta E = 25$ МэВ/м, которые существуют в промышленном выпуске, позволяет создать компактный ускоритель электронов на энергию 2 ГэВ [4] с возможностью размещения в существующем ускорительном зале комплекса Отдела физики высоких энергий ФИАН в г. Троицке, что обеспечит существенное удешевление общей стоимости создания нового ускорителя. Планируется рекуперация энергии электронного пучка, что значительно снизит энергозатраты и позволит достичь энергии 2 ГэВ при большом токе пучка.

Среди большого круга научных задач, решаемых на электронных ускорителях с энергией в ГэВ-ной области энергий, в программе нового ускорителя в ФИАНе основное внимание будет уделено проблемам создания и изучения мезо-ядер, т.е. ядер, в составе которых, помимо нуклонов, могут находиться и мезоны.

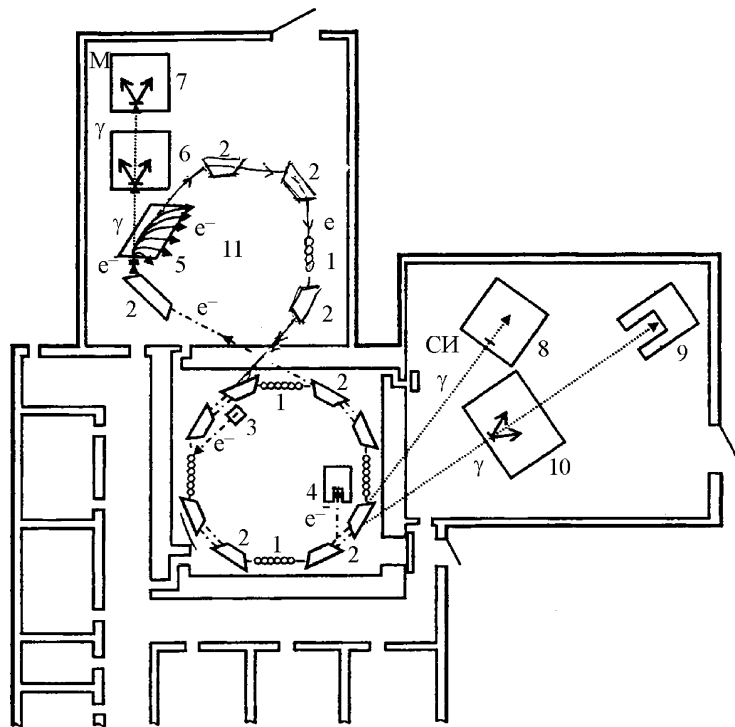


Рис. 1: Схема размещения ускорителя электронов на основе криогенных ВЧ-структур с энергией $E = 2$ ГэВ и экспериментальных установок в залах ускорительного комплекса ФИАН в г. Троицке. 1 – ускоряющие ВЧ-структуры, 2 – магнитные линзы, 3 – инжектор электронов, 4 – “могильник” e^- -пучка, 5 – система мечения γ -квантов, 6 – экспериментальная установка, 7 – система мечения мезонов, 8 – установка для СИ пучков, 9 – “могильник” для γ -пучка, 10 – установка для работы с тормозным спектром, 11 – схема рециркуляции электронного пучка.

Ниже пойдет речь об изучении ядерного взаимодействия изоскалярных η -, ω -, η' - и φ -мезонов с использованием непрерывных во времени пучков электронов и γ -квантов с энергиями $E \approx 2$ ГэВ. Постановка эксперимента описана в [2]. Схематичный план расположения ускоряющих структур нового 2 ГэВ-го ускорителя в ускорительном зале и план размещения экспериментальных установок в экспериментальных залах комплекса “ПАХРА” представлен на рис. 1. В одном из них намечается получение меченого по энергии пучка гамма-квантов, на основе выведенного в этот зал пучка электронов, и, затем, получение меченых по энергии мезонов. Во втором экспериментальном зале планируется получение квазимонохроматических пучков гамма-квантов высокой интенсивности путем применения обратного комптон-эффекта, а также обычных пучков

тормозного излучения. Разрабатывается вариант накопительного кольца диаметром порядка 40 метров с целью создания световых пучков высокой яркости (4-го поколения) на основе ввода пучка электронов из ускорителя в накопитель.

Мечение по энергии короткоживущих мезонов предполагается проводить на основе процесса фоторождения мезона на ядерном нуклоне: $\gamma + N \rightarrow M + N$, с регистрацией и измерением энергии ядерного нуклона, на котором произошло рождение. При известной энергии гамма-кванта энергия мезона будет равна $E(M) = E(\gamma) - E(N)$. В случае короткоживущих мезонов, которые практически не вылетают из мишени, где они возникли, изучение их взаимодействия с нуклонами ядра возможно путем регистрации вторичных продуктов реакции.

Использование меченых по энергии мезонов явится эффективным средством изучения взаимодействия мезонов с нуклонами и ядрами. Оно обеспечит получение энергетических зависимостей первичных процессов взаимодействия элементарных частиц, что пока не удается реализовать в существующих ускорительных центрах.

Эта-мезонные ядра являются новым типом атомных ядер. Эта(η)-мезонное ядро – это сильно связанная адронная система, тогда как обычные ядра – это чисто барионные системы. Впервые теоретические расчеты ядерно-связанной системы η -мезона и ядра были выполнены L. Liu, Q. Haider [5]. Ими был предложен эксперимент на π -мезонном пучке в БНЛ (США), который и был проведен, но с отрицательным результатом.

В 1991 году в работе А. И. Лебедева и В. А. Трясучева [6] было рассмотрено образование эта(η)-мезонных ядер в фотореакции.

Возникновение η -мезона в ядре происходит в результате образования S_{11} (1535) резонанса на ядерном нуклоне: $\gamma + N \rightarrow N + S_{11}$, с последующим распадом S_{11} -резонанса: $S_{11} \rightarrow \eta + N_1$, и вылетом нуклона N_1 “вперед”. В этом случае η -мезон будет обладать малой кинетической энергией и с большой вероятностью останется в ядре, образуя η -ядро. Вероятность распада S_{11} -резонанса на ηN -пару составляет около 50%, что означает большую вероятность вторичного образования S_{11} -резонанса в результате ядерного взаимодействия η -мезона с одним из нуклонов ядра. При распаде $S_{11} \rightarrow \eta N$ внутри ядра обе частицы, как правило, остаются в ядре, поскольку S_{11} -резонанс обладает малой кинетической энергией (на уровне ферми-импульса). Таким образом в эта-ядре может возникнуть цепочка переходов

$$\eta + N \rightarrow S_{11} \rightarrow \eta + N \rightarrow \dots \rightarrow S_{11} \rightarrow \eta + N \rightarrow S_{11} \rightarrow \dots$$

Такая картина эволюции эта-ядра позволила В. И. Ритусу [10] сравнить эта-ядро с ядерным резонатором с двумя уровнями: ηN и S_{11} , но с плохой добротностью, т.к. после 3–5

колебаний $\eta N \leftrightarrow S_{11}$ колебания прекращались, т.к. эта-ядро распадалось по каналу $S_{11} \rightarrow \pi + N$.

Существует также канал распада эта-ядра, связанный с процессом взаимодействия S_{11} (1535)-резонанса с нуклоном ядра: $S_{11} + N \rightarrow N_2 + N_3$.

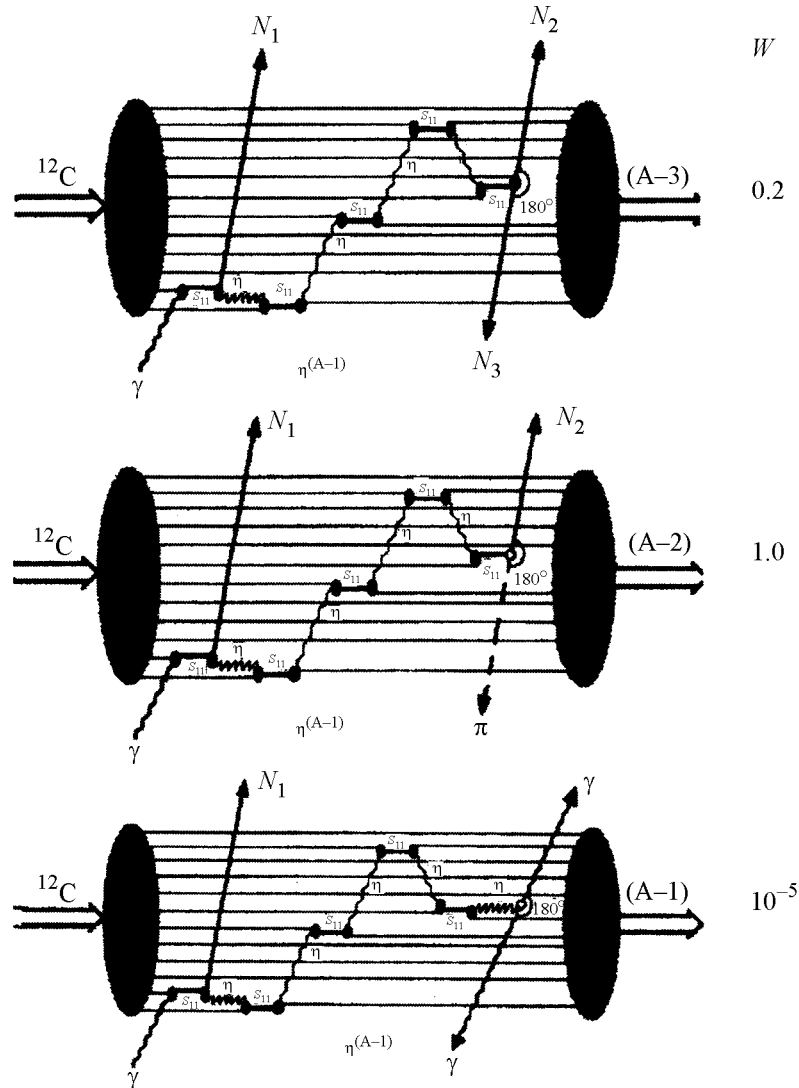


Рис. 2: Схема образования η -мезонного ядра в γA -реакции, его эволюция и распад по NN , πN , и $\gamma\gamma$ -каналам.

Схема образования η -мезонного ядра в γA -реакции, его эволюция и распад по NN , πN и $\gamma\gamma$ -каналам представлена на рис. 2. Эта схема соответствует постановке эксперимента на пучке тормозного излучения синхротрона ФИАН, где впервые были обнаружены эта (η)-ядра в реакции $\gamma + {}^{12}\text{C} \rightarrow p(n) + \eta (A - 1) \rightarrow \pi^+ + n + X$ [7–9].

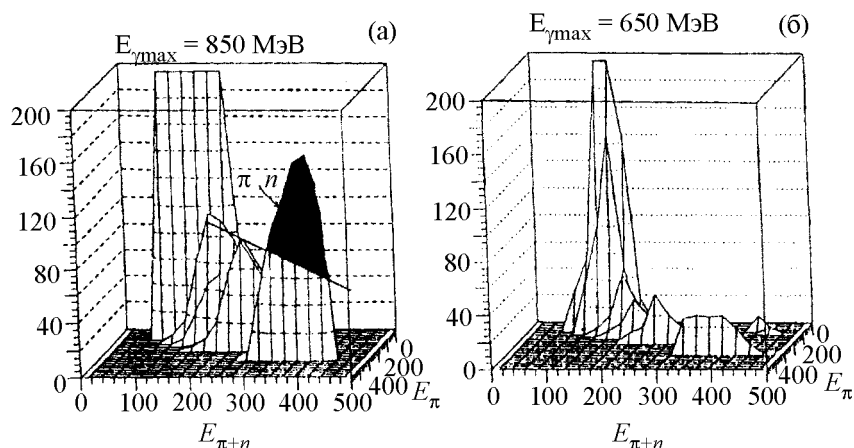


Рис. 3: Двухмерные распределения коррелированных (π^+, n) -пар в зависимости от кинетической энергии E_{π^+} и $E_{(\pi^+n)}$ для $E_{\gamma\max} = 650$ и 850 МэВ.

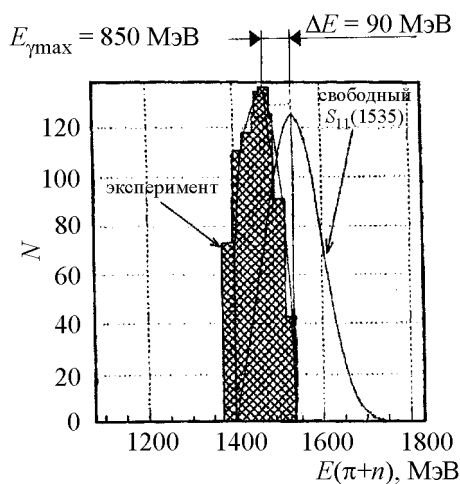


Рис. 4: Экспериментальное распределение по суммарной энергии $E = E_{\pi} + E_n$ продуктов распада S_{11} -резонанса внутри ядра в сравнении с распадом свободного S_{11} -резонанса.

Эксперименты в ФИАНе были начаты в 1994 году. Результаты эксперимента представлены на рис. 3 и 4 в виде 2-х распределений по суммарной энергии $E_i(\pi, n)$, полученного в эксперименте и при распаде свободного S_{11} -резонанса. В предположении, что (π^+, n) -события возникают в результате распада в ядре S_{11} -резонанса, можно сделать вывод, что экспериментальные данные свидетельствуют об уменьшении массы S_{11} -резонанса, находящегося в ядерной среде.

В 2008-2009 годах на синхротроне ФИАН были продолжены исследования эта-мезонных ядер и получены результаты, подтвердившие данные 1999-2000 годов [7–9]. Намечается продолжение экспериментов по эта-ядрам на синхротроне ФИАН, а затем на 2 ГэВ-ом ускорителе, как для получения большей статистики событий, так и для измерений выходов (π, N), а также ($N_1 N_2$) и ($N_1 N_2 N_3$)-событий для разных ядер и в более широком диапазоне энергий пучка электронов.

Создание ускорителя электронов на энергию 2 ГэВ и систем мечения по энергии гамма-квантов и мезонов, а также проведение экспериментальных исследований, предполагают активное участие физиков ФИАН, а также ИЯИ РАН, НИИЯФ МГУ, ЛФВЭ ОИЯИ, МИФИ, ИЯФ ТПУ и ряда других научно-исследовательских и учебных институтов России.

Организация в г. Троицке Центра электромагнитных исследований (ЦЭМИ) позволит объединить усилия ряда институтов РАН и Министерства образования и науки и будет содействовать активному развитию электромагнитных исследований в ядерной физике и физике элементарных частиц.

Авторы выражают благодарность В.И. Ритусу за обсуждение поднятых в статье вопросов и ценные замечания.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] S. V. Akkelin, Yu. M. Sinyukov, Phys. Rev. C **73**, 034908 (2006).
- [2] G. A. Sokol, E. M. Leikin, arXiv: nucl-ex/09021408 v.1.(2009); Краткие сообщения по физике ФИАН **37**(7), 15 (2009).
- [3] M. Kotulla et al., Phys. Rev. Lett. **100**, 192302 (2008); R. Nasseripour et al., arXiv: nucl-ex/07072324 v.3 Jul 2007; V. Metag, arXiv: nucl-ex/0711.4709 v.3 Mar 2008; S. Schadmand, arXiv: nucl-ex/0709.2903 v.1 Sep 2007; T. Mertens et al., arXiv: nucl-ex/0810.2678 v.1 Okt 2008; M. Hedayati-Poor, H. S. Sharif, Phys. Rev. C **76**, 055107 (2007); R. Hayano, Nucl. Phys. A **805**, 295 (2009).
- [4] V. G. Kurakin et al., Proc. RuPAC 08, Zvenigorod, Russia, p. 107 (М., ИЯИ, 2008).
- [5] L. Liu, Q. Haider, PR C **34**, 1845 (1986).
- [6] A. I. Lebedev, V. A. Tryasuchev, J. Phys. G. Nucl. Phys. **17**, 1197 (1991).
- [7] Г. А. Сокол, Препринт ФИАН 5 (М., 2005).
- [8] G. A. Sokol et al., Fizika B (Zagreb) **8**(1), 85 (1999).
- [9] Г. А. Сокол и др., Письма ЭЧАЯ **5**(102), 71 (2000).
- [10] В. И. Ритус – отзыв на диссертацию Г. А. Сокола (2004 г.)

Поступила в редакцию 19 апреля 2010 г.

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК a-C:H:Si И ИХ СТРУКТУРНЫХ МОДИФИКАЦИЙ

В. Д. Фролов, В. А. Герасименко, С. М. Пименов

Приводятся данные измерений спектров отражения света видимого и УФ-диапазона алмазоподобных пленок a-C:H:Si и их структурных модификаций, возникающих при электрических воздействиях на пленки в сканирующем зондовом микроскопе (СЗМ)-литографе. Численные оценки экспериментальных данных с учетом эффектов интерференции показывают, что модификация носит объемный характер и вызывает изменение показателя преломления материала от $n \sim 2.2$ до $n \sim 1.5$. Уменьшение оптической плотности модифицированного материала связывается с повышением пористости пленки в зоне СЗМ-воздействий.

Ключевые слова: оптические свойства пленок, a-C:H:Si, спектры отражения, алмазоподобные пленки.

Благодаря высокой механической прочности и адгезии к различным подложкам, химической стойкости, прозрачности в видимом и УФ-диапазоне, алмазоподобные пленки a-C:H:Si являются практически идеальным материалом для покрытий в различных микро- и нанoeлектромеханических системах [1, 2]. Наряду с этим, пленки a-C:H:Si обладают уникальной способностью к модификации под действием электрического поля зонда сканирующего зондового микроскопа (СЗМ)-литографа, которая внешне проявляется в образовании конусообразных выступов на поверхности пленок [3, 4]. Процесс носит стабильный и воспроизводимый характер, что позволяет формировать массивы конусов с различным топологическим рисунком. Представляет интерес определить оптические характеристики модифицированных областей пленок a-C:H:Si.

Эксперименты выполнены с использованием спектроскопии локального отражения света. Сравнительные измерения спектров локального отражения исходных пленок и