

06.3;07

Интенсивная люминесценция с перестраиваемой длиной волны из пленок тетраэдрического аморфного гидрированного углерода на подложке из плавленного кварца

© М.Е. Компан, О.И. Коньков, Е.И. Теруков,
И.Н. Трапезникова, И.Ю. Шабанов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 4 декабря 1996 г.

Предлагается модель нового типа оптоэлектронного устройства с использованием люминесценции пленки $ta-C:H$ в плоскости подложки из плавленного кварца. Обнаружено, что излучение люминесценции, распространяющееся в объеме подложки, претерпевает существенную монохроматизацию. В то же время по нормали к плоскости подложки наблюдается типичная для $ta-C:H$ люминесценция в широком спектральном диапазоне. Такая люминесценция визуально белая, в то время как цвет люминесценции в плоскости подложки зависит от толщины пленки. Пленка с переменной толщиной позволяет получить излучение с цветом, меняющимся от бирюзового до красного.

Такой эффект монохроматизации излучения в системе пленка-на-подложке наблюдается впервые.

В последние годы пристальное внимание исследователей привлекают пленки тетраэдрического аморфного ($ta-C:H$) и алмазоподобного (DLC) углерода. До сих пор собственные люминесцентные свойства этих материалов не рассматривались как источник обещающих применений. В то же время известно, что люминесценция $ta-C:H$ легко возбуждается светом ультрафиолетового и видимого диапазона. Полоса люминесценции при возбуждении ультрафиолетом (337 нм) занимает почти весь видимый диапазон (от 450 до 650 нм по уровню 0.25 от max), причем эффективность высвечивания достигает 0.2 [1,2], что сравнимо с эффективностью свечения таких известных лазерных красителей, как оксазины.

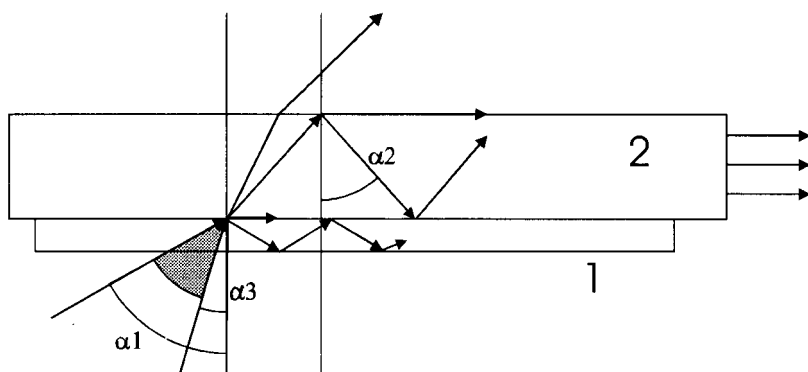


Рис. 1. Принцип монохроматизации в двухслойной системе пленка ta -С:Н (1) на подложке из плавленного кварца (2). Пояснения смотри в тексте.

В данной работе была предпринята попытка использовать люминесцентные свойства ta -С:Н и конструктивные особенности пленок, получаемых на подложках, для создания прототипа мощного источника видимого излучения с перестраиваемой длиной волны. Мы использовали свойство системы пленка-на-подложке являться своеобразным монохроматором для излучения, каналируемого в теле прозрачной подложки.

Рассмотрим ход лучей в такой системе (рис. 1). Способность пленок с толщиной порядка длины волны давать интерференционную окраску в отраженном свете общеизвестна. Однако в данном случае источник излучения находится внутри пленки, испускание света люминесценции изотропно и монохроматизация по обычному интерференционному механизму происходить не может, так как при наложении света разных длин волн, выходящего под разными углами, снова будет синтезирован белый свет. Однако двухслойная система, изображенная на рис. 1, будет обладать способностью к монохроматизации белого света, испускаемого пленкой. Наличие подложки с коэффициентом преломления (n_s), имеющим промежуточное значение между коэффициентами преломления воздуха (n_0) и ta -С:Н пленки (n_f)

$$n_0 < n_s < n_f,$$

позволяет осуществить угловую селекцию излучения, каналируемого в теле подложки. На границе пленка-подложка осуществляется первое

разделение света люминесценции по направлениям. Свет люминесценции, распространяющийся в пленке под углами к нормали, большими, чем α_1 , — предельный угол полного внутреннего отражения для границы пленка–подложка, канализируется в самой люминесцирующей пленке и не выходит в подложку. Аналогично этому свет, попавший в подложку, селективируется на границе подложка–воздух. Лучи, распространяющиеся в подложке под углами к нормали предельного угла полного внутреннего отражения (α_2) и более, не выходят из пленки и канализируются подложкой.

Свет, распространяющийся под меньшими углами к нормали, выходит из подложки. Направление распространения света люминесценции в пленке, которое после преломления будет соответствовать предельному углу полного внутреннего отражения в подложке, обозначено как α_3 . Таким образом, подложка будет собирать излучение люминесценции, исходно испущенное в пленке *ta*-C:H в диапазоне углов между α_1 и α_3 по отношению к нормали. Наличие угловой селекции излучения за счет двуслойности системы позволяет рассматривать интерференцию в излучающей пленке как обычную интерференцию для света, распространяющегося в узком диапазоне углов, что и приведет к монохроматизации света люминесценции, наблюдаемого с торца подложки. При этом толщина излучающей свет пленки явится параметром, определяющим, для какой из длин волн спектра люминесценции возникнет максимум, поскольку из обычных параметров, определяющих условие для интерференции в тонкой пленке — угла направления распространения света и толщины, первый фиксирован условиями полного внутреннего отражения.

Пленки *ta*-C:H были получены путем разложения метанаргоновой смеси 10% CH₄–90%Ar в плазме ВЧ тлеющего разряда [3]. Осаждение осуществлялось на подложки плавленого кварца ($n_s = 1.4$) при температуре 150°C. Толщина пленок в максимуме составляла 0.8 мкм. Градиент толщины создавался закреплением подложки у края разрядного промежутка реакционной камеры и составлял 0.5 мкм на длине 10 мм. Показатель преломления полученных пленок составлял 2.4 и не зависел от толщины.

Спектры фотолюминесценции полученных пленок при возбуждении источниками света с энергией квантов от 1.83 до 3.68 эВ измерялись при комнатной температуре. При энергии возбуждающих квантов 2.9–3.68 эВ форма спектров практически одинакова и характеризуется

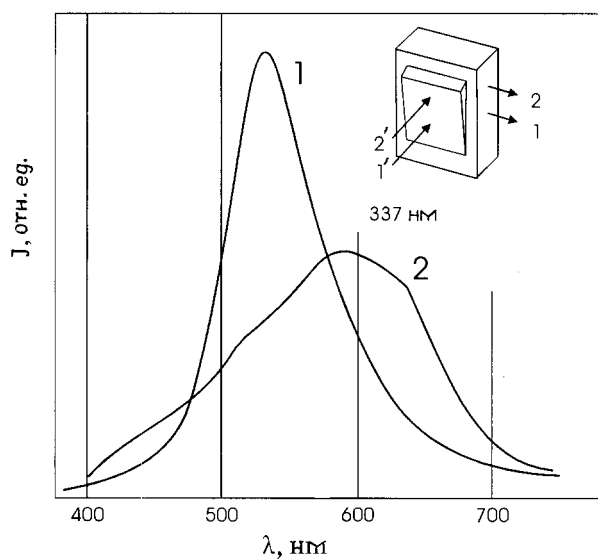


Рис. 2. Спектры люминесценции для пленки $ta-C:H$ с переменной толщиной, зарегистрированные из торца подложки. Набор спектров, представленных на рисунке и обозначенных 1 и 2, получен для соответствующих различных точек пленки простым сдвигом образца в плоскости, как показано на вставке. Толщина пленки в точке 1 — 0.4 мкм, в точке 2 — 0.7 мкм. 1', 2' — возбуждающие пучки.

следующими параметрами: $h\nu_{\max} = 2.2$ эВ, полуширина 0.8 эВ, квантовая эффективность люминесценции 0.15. Последующее уменьшение энергии возбуждающих квантов приводит к деформации спектра за счет обрезания его высокоэнергетического крыла. При этом наблюдается уменьшение полуширины спектра фотолюминесценции, смещение положения максимума в область меньших энергий [4,5].

Подчеркнем, что описанная люминесценция наблюдается при регистрации спектра нормально к плоскости подложки. Спектр же люминесценции, регистрируемый с торца подложки, оказывается различным для различных толщин пленки.

На рис. 2 показаны спектры люминесценции для пленки $ta-C:H$ с переменной толщиной, зарегистрированные из торца подложки, при возбуждении лазерным излучением с $\lambda = 337$ нм. Излучающая пленка

однородна по материалу, что подтверждается контролем за спектром свечения при регистрации по нормали к подложке. Набор спектров, представленных на рисунке, получен для различных точек пленки простым сдвигом образца в плоскости. Визуально цвет свечения с торца подложки при этом изменялся от бирюзового до красного. Это подтверждает изложенный выше принцип монохроматизации. Предложенная схема монохроматизации, насколько нам известно, не использовалась другими авторами.

Необходимо также дополнительно отметить, что при исследовании зависимости вида спектров от интенсивности возбуждения наблюдались эффекты изменения ширины полосы. Это свидетельствует о том, что в системе ta -С:Н могут быть найдены эффекты суперизлучения и предложенный источник перестраиваемого излучения может явиться прообразом нового типа твердотельного лазера с перестраиваемой длиной волны.

Авторы благодарны Б.П. Захарчене за обсуждение результатов экспериментов.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта Миннауки 1С91.1ЛФО20, РФФИ N 96-02-16851a и Аризонского университета, США.

Список литературы

- [1] Васильев В.А., Волков А.С., Мусабеков Е., Теруков Е.И. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. С. 1675–1678.
- [2] Chernyshov S.V., Terukov E.I., Vassilyev V.A., Volkov A.S. // J. Non-Cryst. Sol. 1994. V. 134. P. 218–223.
- [3] Коньков О.И., Теруков Е.И., Трапезникова И.Н. // ФТП. 1997 (в печати).
- [4] Васильев В.А., Волков А.С., Мусабеков Е., Теруков Е.И., Чернышев С.В. // ФТТ. 1990. Т. 32. В. 3. С. 784–788.
- [5] Васильев В.А., Теруков Е.И., Трапезникова И.Н., Челноков В.Е. // ФТП. 1996. Т. 30. В. 9. С7 1621–1625.

Публикуемые ниже статьи — последние работы доктора технических наук, профессора Александра Семеновича Тагера. Эти работы остались на его столе после скоропостижной смерти, последовавшей 1 января 1996 г. на семидесятом году жизни, и были подготовлены к печати коллегами и друзьями.

А.С. Тагер вошел в мировую науку как создатель нового класса полупроводниковых приборов — лавиннопролетных диодов. Это выдающееся достижение было отмечено Ленинской премией.

В последние годы им был предложен ряд новых приборов, использующих продольный баллистический транспорт в неоднородных квантоворазмерных структурах.

Развитию этих идей и посвящены публикуемые статьи.

А.С. Тагер был постоянным автором нашего журнала и близким другом многих из нас. Мы сочли своим долгом предварить эту публикацию кратким вступлением, посвященным его памяти.

Редколлегия