

Измерения проводились в один и тот же момент времени $t=80$ мкс от начала импульса. При этом максимальное относительное изменение тока I и напряжения на дуге $u_{ак}$ не превышало $\Delta I/I < 0.05$, $\Delta u_{ак}/u_{ак} < 0.1$, что указывает на хорошую повторяемость данных. Укажем на отличие определенной таким образом величины u_c от φ_c . Это связано с различием между $u(x)$ и истинным потенциалом плазмы $\varphi(x)$, а также с тем, что полученное из линейной экстраполяции катодное падение включает в себя, кроме φ_c , падение напряжения $\Delta\varphi_T$ в той области прикатодного слоя, где температура $T(x)$ тяжелой компоненты релаксирует к T_0 : $\varphi_c = u_c + \varphi_{из} - \Delta\varphi_T$. Все это позволяет определить φ_c лишь по порядку величины $\varphi_c \sim 10$ В.²

Для проверки полученных результатов были проведены измерения зависимости полного напряжения $u_{ак}$ на дуге от межэлектродного расстояния $L_{ак}$ в тот же момент времени $t=80$ мкс после подачи импульса напряжения. Зависимость $u_{ак}(L_{ак})$ приведена на рис. 3. Экстраполяция $u_{ак}(L_{ак})$ в точку $L_{ак}=0$ дает значение суммарного приэлектродного падения напряжения $u_{зд} = u_{ак}(0)$. Некоторое превышение $u_{зд}$ над величиной $u_c + u_a$, полученной выше, может быть связано, например, с различием в условиях горения длинной и короткой дуг.

5. Таким образом, измеренная в настоящей работе величина $u_c \simeq 10-20$ В подтверждает выводы теории [1] о малости прикатодного падения напряжения в сильноточных импульсных дугах высокого давления. Отметим, что полученные в настоящей работе приэлектродные падения напряжения согласуются с результатами работы [5]. В [5], однако, измерены лишь суммарные значения приэлектродных падений, т. е. величина $u_0 = u_c + u_a$ без разделения на составляющие u_c и u_a . Отметим также, что в настоящей работе в отличие от [6] наблюдался устойчивый рост величины u_0 при увеличении начального давления p_0 в камере.

Авторы благодарят Г. А. Дюжева, В. Г. Иванова, А. Б. Рыбакова и С. М. Школьника за помощь в работе и обсуждение результатов.

Список литературы

- [1] Бахит Ф. Г., Бородин В. С., Журавлев В. Н., Рутберг Ф. Г. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 12. С. 2296—2305.
- [2] Баулин Н. Н., Пиллюгин Н. Н., Сунцов Г. Н., Чирняевский С. Ю. // ПТЭ. 1978. № 5. С. 247—249.
- [3] Брагинский С. И. // Вопросы теории плазмы / Под ред. М. А. Леонтовича. М.: Атомиздат, 1962. Вып. 1. 287 с.
- [4] Мак-Даниель И., Мэзон Э. Подвижность и диффузия ионов в газах. М.: Мир, 1986. 422 с.
- [5] Митин Р. В. // Свойства низкотемпературной плазмы и методы ее диагностики. Новосибирск: Наука, 1977. 295 с.

Филиал Всесоюзного
научно-исследовательского института
электромашиностроения
Ленинград

Поступило в Редакцию
29 декабря 1989 г.

06; 07

Журнал технической физики, т. 60, в. 11, 1990

© 1990 г.

ПОКАЗАТЕЛЬ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК $(\text{PrYbFeGa})_2\text{O}_{12}$ СО СТРУКТУРОЙ ГРАНАТА

А. Н. Агеев, М. В. Байдакова, О. Н. Дикарев, О. Г. Руткин,
Ю. Г. Саксонов, А. С. Трифонов

В интегральной магнитооптике для создания невзаимных функциональных элементов (вентилей, циркуляторов, гираторов и т. д.) могут быть использованы такие эффекты, как невзаимное преобразование между двумя волноводными модами, волноводной модой и модой излучения или невзаимный фазовый сдвиг моды [1]. При усовершенствовании технологии изготовления магнитооптических волноводов может оказаться, что устройства, основанные

² В ряде случаев при точном определении φ_c может быть существенна также контактная разность потенциалов между зондом и электродами.

на взаимодействии волноводных мод, будут иметь преимущества (в плане миниатюризации) перед использующими волну утечки [2] или невзаимный фазовый сдвиг [3].

Необходимым условием эффективного взаимодействия мод является, как известно, выполнение условия их фазового синхронизма. Оно может быть обеспечено достаточно точным подбором конкретных значений величин оптической анизотропии, толщины и показателя преломления пленки. Для получения необходимого двупреломления можно использовать, например, фотоупругий механизм оптической анизотропии. Управлять им можно с помощью изменения состава пленки, подбирая соответствующее рассогласование параметров решеток пленки и подложки. При этом необходимо знать, как ведет себя показатель преломления, так как его величина может влиять на условие фазового синхронизма.

В настоящей работе изучалось поведение показателя преломления в эпитаксиальных пленках феррит-гранатов с положительной оптической анизотропией и магнитной анизотропией типа «легкая плоскость». Именно такие пленки перспективны в интегральной оптике. Пленки феррит-гранатов, содержащие празеодим, иттербий и галлий, выращивались методом жидкофазной эпитаксии при постоянной температуре в пересыщенном расплаве на подложках ориентации (111) из гадолиний-галлиевого граната. Молярные соотношения в шихте следующие: $R_1=20$, $R_2=8$, $R_3=15.6$, $R_4=0.1$ (обозначения величин соответствуют использованным в [4]) и отношения $Rt/Yb=0.7$.

Номер пленки	$T_p, ^\circ C$	Состав										$a_0, \text{Å}$	
		докеадрические узлы				октаэдрические узлы			тетраэдрические узлы			измерение	для расчета состава
		Pr ¹ (Pr) ²	Yb (Yb)	Pb ²⁺ (Pb)	Pb ⁴⁺	Pt (Pt)	Fe (Fe)	Ga	Fe	Ga (Ga)	O (O)		
1	818.0											12.4087	
2	818.2	1.02	1.93	0.05	0.00	0.05	1.91	0.04	2.15	0.85	12	12.4096	12.409
3	818.3	(1.07)	(1.88)	(0.05)		(0.05)	(4.06)			(0.89)	(12)	12.4086	± 0.001
4	818.3											12.4095	
5	828.0											12.3992	
6	828.5	0.92	2.02	0.05	0.01	0.04	1.91	0.05	2.16	0.84	12	12.3990	12.398
7	828.7	(1.04)	(1.90)	(0.06)		(0.04)	(4.07)			(0.89)	(12)	12.3970	± 0.001
8	829.0											12.3988	
9	829.0											12.3983	
10	838.0	0.84	2.11	0.05	0.00	0.05	1.90	0.05	2.09	0.91	12	12.3919	12.390
11	838.0	(0.96)	(1.99)	(0.05)		(0.05)	(3.99)			(0.96)	(12)	12.3881	± 0.001

¹ Расчет.

² Измерение на MS-46 фирмы Самеса.

Были исследованы одиннадцать пленок, которые по температуре роста T_p можно разбить на три группы (см. таблицу). К первой группе относятся пленки с номерами 1—4, ко второй — 5—9 и к третьей — 10, 11. Состав пленок исследовался с помощью рентгеновского микроанализатора MS-46 фирмы Самеса. Было обнаружено вхождение в пленки примесей Pb и Pt. Ошибки при определении весовых процентов ионов Fe и Ga составляли 3%, для ионов Pr, Yb 5—10%, а для Pb и Pt 10%. Было установлено, что в пределах точности эксперимента составы пленок в каждой из трех групп не различаются. Усредненные по всем пленкам каждой группы составы приведены в таблице. Имеет место довольно четкая корреляция между T_p и содержанием празеодима и иттербия, а именно с увеличением T_p содержание Pr уменьшается, а Yb возрастает. Хотя эти изменения невелики, но их тенденция установлена надежно. Содержание же остальных ионов остается практически неизменным (изменения лежат в пределах ошибки эксперимента).

Представляло интерес рассчитать параметры решеток этих составов по известным моделям и сравнить с экспериментальными, которые могут быть найдены из измерений рентгеновской дифракции. Измерения проводились на двухкристальном дифрактометре. Использовался восьмой порядок отражения Си K_α -излучения от монохроматора из гадолиний-галлиевого граната ориентации (111). Измерялась разность брэгговских углов $\Delta\theta$ пленки и подложки для различных рефлексов. Из симметричных соображений ясно, что при наличии выделенного направления вдоль оси третьего порядка возможен переход к ромбоэдрической структуре, которая может быть описана длиной ребра a_r и одним из углов ромба, например тем, который меньше 90° . Обозначим его α . Из измерений межплоскостных расстояний могут

быть найдены эквивалентные параметры, соответствующие орторомбической ячейке $a_{\perp} = a_f \sqrt{1 + \cos 2\alpha}$, $a_{\parallel} = a_f \sqrt{2} \sin(\alpha/2)$. Деформацию пленки удобно характеризовать разностью перпендикулярной $U_{\perp} = (a_{\perp} - a_0)/a_0$ и продольной $U_{\parallel} = (a_{\parallel} - a_0)/a_0$ деформаций

$$U_{\perp} - U_{\parallel} = \frac{a_{\perp} - a_{\parallel}}{a_0}, \quad (1)$$

где a_0 — параметр решетки ненапряженной пленки.

В области псевдоморфизма, когда $a_{\parallel} = a_s$ (a_s — параметр решетки подложки), величина (1) практически совпадает с обычно используемой в литературе $(a_{\perp} - a_s)/a_s$. Область псевдоморфизма может быть определена по отклонению от линейной зависимости $\cos \alpha$ от параметра $(a_f/a_s)^2 - 1$ [5]. Из рис. 1 видно, что для пленок из первой группы (пленка 1) имеет

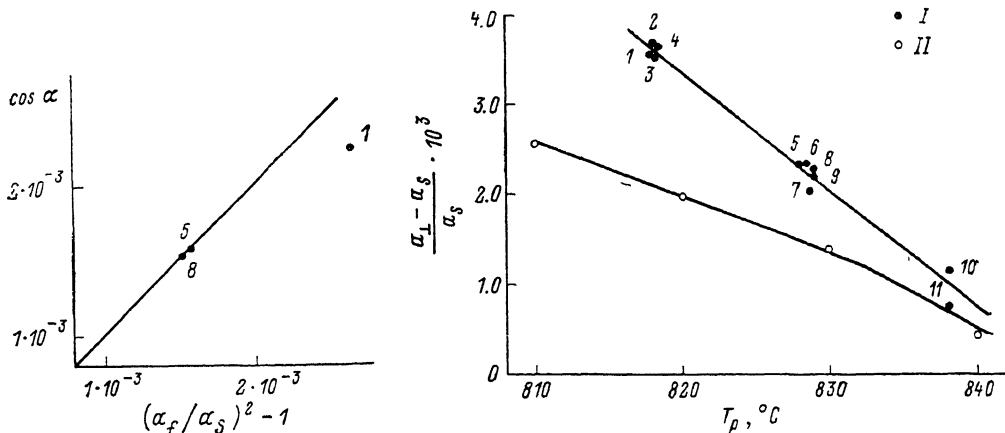


Рис. 1. Зависимость угла ромба α элементарной ячейки кристалла пленки от параметра несоответствия решеток пленки a_f и подложки a_s .

Цифрами обозначены номера пленок.

Рис. 2. Зависимость $(a_{\perp} - a_s)/a_s$ от температуры роста пленок T_p .

I — настоящая работа, II — данные [6]. Цифрами обозначены номера пленок.

место небольшое отклонение от прямой пропорциональности. Соответствующий отпуск $a_{\perp} - a_s = 2.5 \cdot 10^{-3}$ Å. Пленки второй и третьей группы лежат в области псевдоморфизма.

На рис. 2 приведены зависимости величины $(a_{\perp} - a_s)/a_s$ от температуры роста и данные работы [6] для пленок, выращенных из аналогичной пихты. Обе зависимости показывают увеличение деформации при уменьшении температуры роста. Различие зависимостей связано с особенностями технологий выращивания.

Параметр решетки недеформированной пленки можно выразить следующим образом:

$$a_0 = (a_{\perp} + h_{111}a_{\parallel}) / (1 + h_{111}), \quad (2)$$

где $h_{111} = -(U_{\perp}/U_{\parallel}) = (6C_{12} + 2\Delta C) / (3C_{11} - 2\Delta C)$, $\Delta C = C_{11} - C_{12} - 2C_{44}$ и C_{11} , C_{12} и C_{44} — компоненты тензора констант жесткости (в матричных обозначениях). На основе литературных данных [7] можно построить зависимость параметра h_{111} для изоморфного ряда гранатов от параметра их решеток. За некоторым исключением, наблюдается слабый рост h_{111} с увеличением параметра решетки. Для расчета a_0 по формуле (2) нами было использовано значение $h_{111} = 0.8$. Рассчитанные по (2) значения a_0 приведены в таблице. При расчете принималось, что $a_s = a_{\parallel} = 12.3830$ Å. Если учесть их различие для пленок первой группы, то параметр решетки a_0 увеличится на величину 0.001 Å.

Используя результаты работ [8, 9] по изучению зависимости постоянной решетки гранатов от распределения ионов по додекаэдрическим, тетраэдрическим и октаэдрическим узлам, был проведен расчет распределения ионов в исследованных пленках. При расчете варьировалось только соотношение правоедима и иттербия, а содержание остальных ионов соответствовало данным микрорентгеновского анализа с учетом ошибок измерений. Распределение галлия и железа по октаэдрическим и тетраэдрическим узлам определялось из результатов работы [10]. Рассчитанные составы с распределением по узлам приведены в таблице.

Гам же приведены и соответствующие этому распределению параметры решеток. Из таблицы видно, что для получения соответствия между измеренными параметрами решетки и вычисленными необходимо предположить несколько меньшее отношение Pt/Yb , чем то, которое следует из микрорентгеновского анализа.

С помощью волноводной методики были определены обыкновенный ($n^o = n_{TE}$) и необыкновенный ($n^e = n_{TM}$) показатели преломления пленок, значения которых приведены в таблице. Если учитывать изменения показателей преломления только из-за фотоупругой анизотропии (вклад ростовой анизотропии в этих пленках мал), то можно записать

$$n^e - n_0 = -\frac{n_0^3}{6} (\eta + 2\xi), \quad n^o - n_0 = -\frac{n_0^3}{6} (\eta - \xi), \quad (3)$$

где n_0 — показатель преломления недеформированной пленки, $\xi = 2p_{44} (U_{\perp} - U_{\parallel})$, $\eta = (p_{11} + 2p_{12}) (2 + h_{111}) U_{\parallel}$ и p_{11} , p_{12} , p_{44} — компоненты тензора фотоупругости в матричных обозначениях.

Используя данные из [11], можно найти, что изотропный вклад в показатель преломления, описываемый членом η , не превышает величины 10^{-3} для всех исследованных пленок. Пренебрегая этим вкладом, можно найти показатель преломления недеформированной пленки n_0 , зависимость которого от параметра решетки недеформированной пленки a_0 показана на рис. 3. Как видно из рисунка, эта зависимость хорошо описывается линейным законом. Согласно работе [12] показатель преломления гранатов с малым содержанием редкоземельных

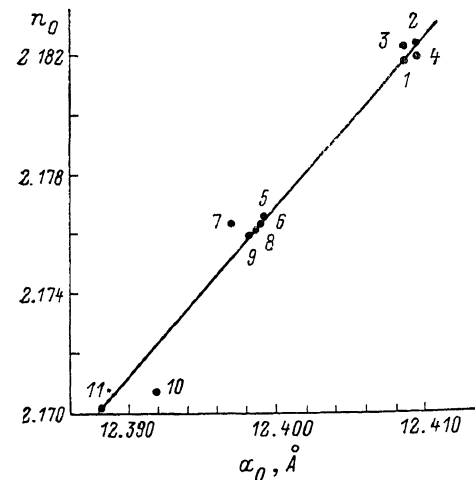


Рис. 3. Зависимость показателя преломления ненапряженной пленки n_0 от параметра решетки a_0 .

Цифрами обозначены номера пленок.

ионов прямо пропорционален содержанию ионов железа. Настоящая работа показывает, что редкоземельные ионы также вносят пропорциональный вклад в показатель преломления. В данном конкретном случае увеличение n_0 связано с увеличением отношения числа ионов празеодима и иттербия, причем определяющим является вклад Pt.

Таким образом, в работе показано, что показатель преломления феррит-гранатов линейно зависит не только от содержания ионов железа, что установлено ранее, но и от содержания додекаэдрических редкоземельных ионов. Это следует учитывать при создании волноводных структур с фазовым синхронизмом мод на основе эпитаксиальных пленок феррит-гранатов с редкоземельными ионами, а также при контроле состава образцов с помощью измерений показателя преломления.

Список литературы

- [1] Прохоров А. М., Смоленский Г. А., Агеев А. Н. // УФН. 1984. Т. 143. Вып. 1. С. 33—72.
- [2] Агеев А. Н., Трифанов А. С., Гриднев В. Н. // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 4. С. 676—683.
- [3] Aurasher F., Witte H. // Opt. Commun. 1975. Vol. 13. P. 435—438.
- [4] Blank S. L., Nielsen J. W. // J. Cryst. Growth. 1972. Vol. 17. P. 302—311.
- [5] Руткин О. Г., Агеев А. Н., Духова Е. Л. и др. // ФТТ. 1983. Т. 25. Вып. 1. С. 204—206.
- [6] Daval J., Ferraud B., Geynet J. // Mat. Res. Bull. 1975. Vol. 10. P. 95—102.
- [7] Kitaeva V. F., Zharikov E. V., Chisyi I. L. // Phys. Stat. Sol (a). 1985. Vol. 92. N 2. P. 475—488.
- [8] Strocka B., Holst P., Tolksdorf W. // Philips J. Res. 1978. Vol. 33. P. 186—202.
- [9] Kitaeva V. F., Eliott M. T. // J. Cryst. Growth. 1974. Vol. 27. P. 253—260.
- [10] Hansen P., Röschmann P., Tolksdorf W. // J. Appl. Phys. 1974. Vol. 45. N 6. P. 2728—2732.
- [11] Dixon R. W. // J. Appl. Phys. 1967. Vol. 38. N 13. P. 5149—5153.
- [12] Wöhlecke M., Suits J. C. // Appl. Phys. Lett. 1977. Vol. 30. N 8. P. 395—397.