

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛОВ ДЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ МОДУЛЯЦИИ СВЕТА

А. А. Бережной, В. З. Гуревич и Ю. В. Попов

Приведена классификация электрооптических кристаллов с точки зрения возможности их использования для пространственно-временной модуляции когерентного света. Обсуждаются особенности модуляторов на различных типах кристаллов. Даны экспериментальные результаты исследования работы лабораторных макетов модулирующих устройств. Делаются выводы о перспективности разработки пространственно-временных модуляторов когерентного света на различных типах электрооптических кристаллов.

Оптические методы обработки информации имеют значительные преимущества перед электронными, особенно при решении задач, связанных с хранением и переработкой больших массивов информации. Однако реализация этих преимуществ возможна лишь при условии создания оперативных устройств ввода оптической информации, основным элементом которых является пространственно-временной модулятор света. Пространственная модуляция светового потока основана на изменении оптических свойств среды под действием двумерных управляющих сигналов.

Одна из потенциальных возможностей создания таких модуляторов света основана на использовании электрооптического (ЭО) эффекта в кристаллах.

Известно большое многообразие электрооптических кристаллов, которые могут быть использованы для модуляции света (табл. 1). Прост-

Таблица 1

Химическая формула	Симметрия	Направление максимального продольного ЭО эффекта	U_{λ} , кВ при $\lambda = 10.63$ мкм	Ссылки	
Первая группа	LiNbO_3	3m	55 к оси [001] в плоскости (100)	~2.3	[19, 20]
	$\text{Ba}_{0.25}\text{Sr}_{0.75}\text{NbO}_3$	4mm	[011]	0.1	[21, 22]
	$\text{Ba}_2\text{NaNb}_3\text{O}_{15}$	mm2	40-50° к оси [001]	~0.6	[23]
	$\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$	m3m	[110]	~0.5 при $d = 0.2$ мм	[6]
	$\text{PbMg}_{1/3}\text{Ta}_{2/3}\text{O}_3$	m3m	[110]	1 при $d = 0.2$ мм	[7]
	DKDP	42m	[001]	~4	[2, 24]
	$\text{Gd}_2(\text{Mo}_3\text{O}_4)_3$	mm2	[001]	Определяется толщиной кристалла и коэрцитивным полем	[26]
$\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$	m	[001]		[10, 25]	
Вторая группа	$\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$	43m	[001]	~4	[27, 28]
	$\text{Bi}_{12}\text{LeO}_{20}$	43m	[001]	5.6	[27, 28]
	ZnSe	23	[001]	11	[29]
	CdS	6mm	[011]	~7	[30, 31]

ранственная амплитудная модуляция некогерентного света может быть превращена в фазовую или амплитудную модуляцию когерентного света с помощью электрооптического модулятора типа «свет—свет». В модуляторах этого типа возможно использование только продольного ЭО эффекта.

Электрооптические кристаллы с точки зрения возможности их использования для пространственно-временной модуляции света можно разделить на две группы: кристаллы, требующие наличия внешнего слоя фотопроводника [1, 2], и кристаллы, обладающие фотоэлектрооптическими свойствами в видимой области спектра [3-5].

Среди кристаллов первой группы, представленных в табл. 1, можно выделить кристаллы, обладающие значительным продольным ЭО эффектом, например LiNbO_3 , $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$, $\text{Ba}_{0,25}\text{Sr}_{0,75}\text{NbO}_3$, $\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$, $\text{PbMg}_{1/3}\text{Ta}_{2/3}\text{O}_3$. Следует отметить, что первые три из перечисленных кристаллов в направлении максимального продольного ЭО эффекта обладают естественной анизотропией, поэтому при их использовании необходимо либо подбирать толщину кристаллической пластины, равной целому числу полуволин модулируемого света, либо предусмотреть возможность компенсации естественной анизотропии.

В работе исследовалась возможность использования полуволинных пластин из кристаллов LiNbO_3 для пространственной модуляции света. В ходе проведенных исследований было обнаружено, что помимо большой величины ЭО эффекта преимуществом кристаллов LiNbO_3 перед применяющимися для целей модуляции кристаллами ДКДР является наличие технологической возможности получения значительно более тонких пластин (30—50 мкм), что позволяет повысить разрешающую способность модулятора. Большой интерес представляет возможность введения в кристаллы LiNbO_3 различных добавок, например ионов железа, изменяющих величину и спектральную область проявления их фоточувствительности. Таким путем кристаллы LiNbO_3 и другие кристаллы первой группы в табл. 1 могут быть переведены во вторую группу, т. е. отнесены к фотоэлектрооптическим кристаллам.

Кристаллы $\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ (PMN) и $\text{PbMg}_{1/3}\text{Ta}_{2/3}\text{O}_3$ (PMT) в отличие от первых трех кристаллов табл. 1 не обладают естественной анизотропией. Квадратичный характер ЭО эффекта в них приводит к зависимости величины полуволинового напряжения ($U_{\lambda/2}$) от толщины кристалла при продольном эффекте. Для кристаллов магнониобата свинца (PMN) толщиной менее 0,2 мм полуволиновое напряжение составляет $\sim 0,5$ кВ [6]. Отсутствие зависимости $U_{\lambda/2}$ от толщины кристалла l при $l \leq 0,2$ мм обусловлено линейризацией ЭО эффекта, которая происходит при напряженностях электрического поля $E=4,5$ кВ/см. В кристаллах магнотанталата свинца (PMT) линейризация продольного эффекта не происходит вплоть до напряженностей порядка 50 кВ/см. Это позволяет, несмотря на величину ЭО эффекта, меньшую, чем в PMN, за счет уменьшения толщины кристалла достичь меньшего $U_{\lambda/2}$ [7].

Детальный разбор работы модулирующего устройства с внешним слоем фотопроводника был произведен на примере кристалла PMN со слоем CdS в качестве фотопроводника [8, 9]. Технические характеристики

Таблица 2

Характеристика	PMN	ZnSe	$\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$	CdS
Оптическая апертура, см ²	0,5	0,5	3	2
Амплитуда электрического импульса, кВ	0,25	1,0—1,5	1,0	1,5
Время записи, с	10^{-2}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-2}
Энергетическая чувствительность, Дж/(см ² ·В)	$4,2 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-9}$	$4 \cdot 10^{-8}$	$4 \cdot 10^{-9}$
Контраст	1 : 1000	1 : 100	1 : 100	1 : 100

этого устройства приведены в табл. 2. При создании модулирующих устройств с внешним слоем фотопроводника сопротивление слоев должно подбираться так, чтобы в отсутствие записывающего излучения управляющее напряжение падало на фотопроводнике, т. е. темновое сопротивление слоя фотопроводника должно значительно превышать сопротивление кристаллической пластины. Это условие в случае кристаллов PMN выполнить трудно из-за его высокого сопротивления ($\rho \sim 10^{14}$ Ом·см), что делает невозможным его использование в статическом режиме (постоянное управляющее напряжение).

Необходимо учесть, что в случае динамического (импульсного) электрического возбуждения устройства в начале электрического импульса распределение напряжения в системе происходит обратно пропорционально емкостям слоев. В случае кристалла PMN ($\epsilon \sim 10\,000$) емкость кристаллической пластины велика по сравнению с емкостью фотопроводникового слоя ($\epsilon \sim 10$), поэтому сначала все напряжение оказыва-

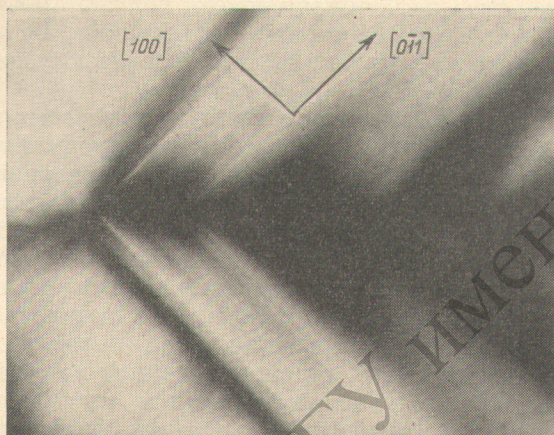


Рис. 1. Слой роста в кристалле PMN.

ется приложенным к фотопроводнику. Затем происходит перераспределение напряжения между слоями с постоянной времени Θ

$$\Theta = \frac{\epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 d_1}{d_2 / \rho_1 + d_1 / \rho_2}, \quad (1)$$

где $\epsilon_{1,2}$; $d_{1,2}$; $\rho_{1,2}$ — диэлектрическая проницаемость, толщина и удельное сопротивление кристалла и фотопроводника. Очевидно, что для возбуждения такой системы длительность электрического импульса должна быть меньше Θ .

Освещение записывающим светом приводит к значительному уменьшению величины Θ за счет уменьшения ρ_2 , что приводит к пространственному распределению потенциального рельефа в кристалле в соответствии с распределением интенсивности в записывающем изображении.

Однако необходимо отметить, что на пути реализации такого модулирующего устройства на кристалле PMN с большой апертурой стоит препятствие, связанное с наличием в этих кристаллах слоев роста, представляющих собой однородные участки кристалла, разделенные тонкими неоднородными слоями, в которых изменение показателя преломления происходит в направлении, перпендикулярном к этим слоям. Располагаются слои в плоскостях куба. На рис. 1 представлена интерференционная картина для среза $[011]$ кристалла PMN, указаны кристаллографические оси.

Следует, однако, отметить, что изменение показателя преломления в слоях роста значительно меньше, чем индуцированное электрическим

полем. Наличие слоев роста связано с условиями синтеза кристаллов и их, по-видимому, можно избежать при отработке технологии получения кристаллов.

В кристаллах РМТ также наблюдаются слои роста, но изменение показателя преломления в них значительно меньше, чем в РМН.

Значительное место среди кристаллов первой группы занимают сегнетоэлектрические кристаллы, в которых изменение показателя преломления достигается за счет переориентации спонтанной поляризации малых изолированных областей. Для этих кристаллов характерна пороговость ЭО эффекта, т. е. для переключения спонтанной поляризации (P_s) и изменения связанной с ней оптической анизотропии необходимо достижение напряженности внешнего электрического поля, превышающей коэрцитивное поле кристалла E . Возможность переориентации P_s зависит не только от амплитуды электрического импульса, но и от его длительности, поэтому в данном случае необходимо, чтобы либо фотопроводник имел темновое сопротивление, превышающее сопротивление ЭО кристалла, либо постоянная времени должна быть много больше, чем время переориентации спонтанной поляризации. Исходя из сказанного, устройства на этих кристаллах не обеспечивают большого быстрого действия.

Характерными представителями сегнетоэлектрических кристаллов являются титанат висмута ($\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$) и молибдат гадолиния ($\text{Gd}_2(\text{MoO}_4)_3$). Структура кристаллов $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ такова, что переориентация оптической индикатрисы при переключении спонтанной поляризации составляет $\pm 5^\circ$ с нормалью к пластине, что приводит к слабому контрасту изображения. Для увеличения контраста приходится использовать специальные методы считывания [10]. Экспериментально исследовались кристаллы молибдата гадолиния, в которых наблюдалось 180-градусное переключение спонтанной поляризации. При переключении происходит изменение знака двойного лучепреломления, но величина его сохраняется. Поэтому максимальный контраст при считывании в этом кристалле имеет место при определенной толщине пластины. Считывание записанного изображения необходимо производить светом, поляризованным по кругу. Интенсивность света, прошедшего через анализатор, в этом случае имеет вид

$$I = I_0 \sin^2 \left(\frac{\pi}{4} \pm \frac{\pi l \Delta n_s}{\lambda} \right), \quad (2)$$

l — толщина пластины, Δn_s — спонтанное двупреломление $\sim 4 \cdot 10^{-4}$.

Очевидно, что максимальная амплитудная модуляция будет иметь место при толщине пластины $l = \lambda / 4 \Delta n_s = 0.39$ мм для $\lambda = 0.63$ мкм.

Следует отметить, что в случае этих кристаллов в отличие от кристаллов с индуцированным двупреломлением разрешающая способность модулирующего устройства не ограничивается толщиной пластины, а зависит от размеров индивидуально переключаемых областей. Необходимо учесть, что в этих кристаллах параметр сегнетоэлектрического перехода связан со спонтанной деформацией, а не поляризацией.

Для исследования локализации процесса переполаризации кристаллов $\text{Gd}_2(\text{MoO}_4)_3$ на центральную часть кристаллической пластины $15 \times 15 \times 0.4$ мм³, вырезанной перпендикулярно направлению [001], наносился прозрачный электрод из In_2O_3 площадью ~ 2 мм². Образец целиком монодоменизировался предварительно внешним электрическим полем $E > 10E_c$ с помощью сплошных электродов, нанесенных на обе поверхности кристалла. При подаче на малый электрод напряжения, противоположного по полярности монодоменизирующему, происходит процесс переполаризации, заключающийся в движении стенки домена, возникшего под действием внешнего поля. При этом оказывается, что процесс движения или область разрастания этого домена не ограничивается площадью электрода, а при достаточной длительности и амплитуде электрического воздействия может занять всю площадь кристалла (рис. 2).

Очевидно, что переключение поляризации в малой локальной области приводит к распространению переключения на соседние участки кристалла, т. е. к существенному ухудшению разрешающей способности модулятора.

Управляющее напряжение такого модулятора определяется толщиной кристалла, так как ЭО эффект управляется пороговым значением напряженности поля. Для кристаллов $Gd_2(MoO_4)_3$ толщиной $l=0.39$ мм управляющее напряжение составляет ~ 100 В, но при этом быстродействие модулятора не превышает 50 мс.

Большой интерес представляет возможность использования в модулирующих устройствах кристаллов, отнесенных в табл. 1 ко второй группе. В этих кристаллах при воздействии света и внешнего электрического поля образуется слой поля объемных зарядов, который удерживается внешними диэлектрическими слоями и определяет индуцированное изменение коэффициента преломления [11, 12]. Величина слоя объемных зарядов определяется диэлектрическими свойствами кристалла и величиной поля. Малая толщина слоя (порядка нескольких микрон) и обуславливает высокое разрешение соответствующих модулирующих устройств.

Наибольший практический интерес среди фотоэлектрооптических кристаллов привлекли кристаллы $Bi_{12}SiO_{20}$ [13-15]. В них удачно сочетается большой продольный ЭО эффект с высокой фоточувствительностью в сине-зеленой области спектра. Наряду с $Bi_{12}SiO_{20}$ следует обратить внимание и на другие фотоэлектрооптические кристаллы, которые, уступая ему по электрооптическим характеристикам, обладают хорошими полупроводниковыми параметрами, в частности большой величиной фотоэффекта, и высокой подвижностью носителей.

Среди фотоэлектрооптических кристаллов для целей пространственной модуляции могут быть использованы лишь кристаллы, обладающие высоким удельным темновым сопротивлением, позволяющим создавать в кристалле большие напряженности электрического поля. Одним из наиболее изученных фотополупроводниковых кристаллов является сульфид кадмия (CdS). Продольный ЭО эффект в этом кристалле наблюдался в направлении [001] [16], т. е. не в направлении оптической оси, поэтому индуцированное двупреломление возникало на фоне большой естественной анизотропии, влияние которой было необходимо исключить. Следует отметить, что в случае кристаллов CdS увеличение толщины кристалла ведет к ухудшению температурной стабильности устройства вследствие наличия температурной зависимости естественной анизотропии кристалла.

Проведенные исследования позволили создать лабораторный макет модулирующего устройства на кристалле CdS (табл. 2). По техническим характеристикам это устройство не уступает устройству на кристалле $Bi_{12}SiO_{20}$, а по быстродействию и энергетической чувствительности превосходит его. К сожалению, имевшиеся в наличии кристаллы $Bi_{12}SiO_{20}$ не обладали достаточной селективностью фоточувствительности на длине волны считывающего света (0.63 мкм), что приводило к понижению контраста изображения при считывании.

Перспектива создания модулирующего устройства на кристаллах селенида цинка (ZnSe) описана в работах [17, 18]. Однако на пути реализации такого устройства с большой апертурой стоят трудности, связанные с оптическим качеством кристаллов, прежде всего с их двойни-

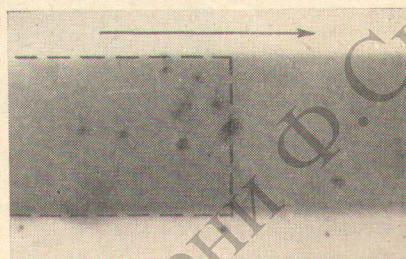


Рис. 2. Домейная структура кристалла молибдата гадолиния.

Штрихами обозначено расположение прозрачного электрода; стрелкой — направление движения домена.

кованием. Двойникование кристаллов ZnSe происходит в направлении [111]. При этом двойники относительно друг друга развернуты на 180° . На границе двойников возникают сильные механические напряжения, которые приводят к оптической неоднородности кристалла. В настоящее время возможно получение недвойникового кристалла размером в несколько квадратных миллиметров.

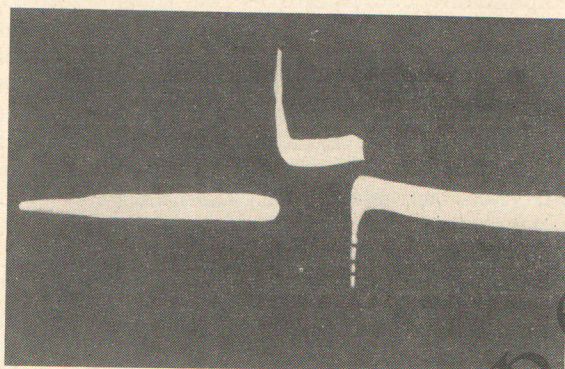


Рис. 3. Оциллограмма светового импульса при напряжениях в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ 1000 В.

При экспериментальном исследовании лабораторных макетов модуляторов на фотоэлектрооптических кристаллах была отмечена важная роль вольт-амперных характеристик диэлектрических слоев в определении энергетических и контрастных характеристик устройства. На рис. 3 представлена оциллограмма светового импульса, считанного с устройства на кристалле $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ светом с $\lambda=0.63$ мкм при записывающем излучении $\lambda=0.44$ мкм, внешнем поле 1000 В и толщине кристалла 200 мкм. Нарушение монотонности экспоненциального спада свидетельствует о нарушении



Рис. 4. Изображение, записанное на кристалле $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$.

линейности вольт-амперной характеристики диэлектрических слоев при повышении напряжения. В связи с этим необходимо уделить серьезное внимание подбору и исследованию диэлектрических слоев, обеспечивающих высокое сопротивление и линейность вольт-амперной характеристики вплоть до напряженностей электрического поля порядка сотен киловольт на сантиметр.

На рис. 4 приведен пример изображения, записанного на кристалле $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$. Следует учесть, что во всех кристаллах второй группы высокий контраст (соответственно и разрешение) могут быть обеспечены лишь в том случае, если фоточувствительность кристалла к считывающей длине волны пренебрежимо мала по сравнению с чувствительностью к длине волны записи.

Итак, анализ и экспериментальное исследование различных типов электрооптических кристаллов показали принципиальную возможность создания пространственно-временных модуляторов света, удовлетворяющих различным требованиям к быстродействию, чувствительности и разрешению. Особое внимание следует уделить решению ряда технологических задач, связанных с улучшением оптического качества кристаллов, которое является основным препятствием на пути создания электрооптических модуляторов света.

Литература

- [1] M. Grenot, J. Pergale, J. Donjon, G. Marie. *Appl. Phys. Lett.*, 21, 3, 83, 1972.
- [2] J. Donjon, F. Dumont, M. Grenot, J. P. Hazan, G. Marie, J. Pergale. *Electron Devices*, ED-20, 11, 1037, 1973.
- [3] D. S. Oliver, P. Vohl, R. E. Aldrich, M. E. Behrndt, W. R. Buchan, R. C. Ellis, J. E. Genthe, J. R. Goff, S. L. Hou, G. McDaniel. *Appl. Phys. Lett.*, 17, 10, 416, 1970.
- [4] D. S. Oliver, W. R. Buchan. *IEEE Trans. Electron. Devices*, ED-18, 9, 769, 1971.
- [5] J. Feinleib, D. S. Oliver. *Appl. Opt.*, 11, 12, 2752, 1972.
- [6] А. А. Бережной. *ФТТ*, 14, 2576, 1972.
- [7] А. А. Бережной, В. М. Федулов, К. П. Скорнякова. *ФТТ*, 17, 9, 1975.
- [8] И. И. Адрианова, А. А. Бережной, В. З. Гуревич, Э. И. Крупицкий, В. А. Письменный, Ю. В. Попов. *Квантовая электроника*, 2, 1, 1975.
- [9] И. И. Адрианова, А. А. Бережной, В. З. Гуревич, Э. И. Крупицкий, Ю. В. Попов. *Изв. АН СССР, сер. физ.*, 39, 6, 1975.
- [10] S. A. Keneman, G. W. Taylor, A. Miller, W. H. Fonger. *Appl. Phys. Lett.*, 17, 4, 173, 1970.
- [11] S. L. Hou, D. S. Oliver. *Appl. Phys. Lett.*, 18, 8, 325, 1971.
- [12] P. Vohl, P. Nisenso, D. S. Oliver. *IEEE Transaction Electron Devices* ES-20, 11, 1032, 1973.
- [13] P. Nisenso, S. Iwasa. *Appl. Opt.*, 11, 12, 2760, 1972.
- [14] Н. Г. Басов, В. Н. Батор, И. И. Компанец, А. Е. Краснов, В. В. Никитин, Г. М. Сафронов, В. А. Степанов. *Краткие сообщения по физике, ФИАН*, 6, 34, 1972.
- [15] S. G. Lipson, P. Nisenso. *Appl. Opt.*, 13, 9, 2052, 1974.
- [16] А. А. Бережной, В. З. Гуревич, Ю. В. Попов. *ФТТ*, 17, 9, 1975.
- [17] А. А. Бережной, В. З. Гуревич. *ФТТ*, 17, 3, 1975.
- [18] А. А. Бережной, В. З. Гуревич, Ю. В. Попов, И. В. Семешкин. *Квантовая электроника*, 2, 8, 1975.
- [19] K. F. Hulme, P. H. Davies, V. M. Couand. *J. Phys.*, pt. C., ser. 2, 2, 855, 1969.
- [20] K. F. Hulme, P. H. Davies, V. M. Couand. *Electron. Lett.*, 5, 171, 1969.
- [21] P. V. Lenzo, E. G. Spenser, A. A. Ballman. *Appl. Phys. Lett.*, 11, 23, 1967.
- [22] E. L. Venturini, E. G. Spenser, P. V. Lenzo, A. A. Ballman. *J. Appl. Phys.*, 39, 343, 1968.
- [23] S. Singh, D. A. Draegert, J. E. Geusie, H. J. Levinstein, R. G. Smith, L. G. Van Uitert. *IEEE J. Quantum Electron (Abstract)*, QE-4, 352, 1968.
- [24] G. Marie. *Philips Tech. Rev.*, 30, 292, 1969.
- [25] S. E. Cummins, T. E. Luke. *IEEE Trans. Sonics Ultrasonics*, SU-19, 2, 125, 1972.
- [26] A. Kumada. *IEEE Trans. sonics and ultrasonics*. SU-18, 2, 115, 1972.
- [27] A. Feldman, W. S. Brower, J. D. Horowitz. *Appl. Phys. Lett.*, 16, 5, 201, 1970.
- [28] R. E. Aldrich, S. L. Hou, M. L. Harvill. *J. Appl. Phys.*, 42, 493, 1971.
- [29] И. И. Адрианова, А. А. Бережной, Ю. В. Попов. *Опт. и спектр.*, 30, 957, 1971.
- [30] J. A. Denis, Gainon J. *Opt. Soc. Am.*, 54, 2, 270, 1964.
- [31] С. А. Абагян, А. В. Антонов, А. А. Давыдов. *ФТП*, 4, 366, 1970.

Поступило в Редакцию 15 декабря 1975 г.