

ՏՈՒՆԻՍԻՆԻ

Препринт ЕФИ-874(25)-86

ԵՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱԿԱՆ ԻՆՏԻՏՈՒՏ
ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Տ. Գ. ԱՐՄԵՆՅԱՆ, Ն. Գ. ԹԵՐ-ԱՐՄԵՆՅԱՆ-ՏԱՎՎԻԴԻ

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ УСКОРЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫМИ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ВОЛНАМИ

ЦНИИатоминформ

ЕРЕВАН-1986

Նախնատիպ **ԷՊՄ-874(25)-86**

ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ Ա.Գ., ՏԵՐ-ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ-ՄԱԿԻՂԻ Ն.Գ.

**ՆՅՈՒԹԵՐ ՄԱԿԵՐԵՄԱՅԻՆ ԷԼԵԿՏՐԱՄԱԿՆԻՍԱԿԱՆ ԱԼԻԲՆԵՐՈՎ
ԱՐԱԳԱՑՄԱՆ ՀԱՄԱՐ**

Օպտիկական ախրուձյան մասին մեծաթիվ գրականության ուսումնասիրման հիման վրա մշակվել են հանձնարարականներ՝ մակերեսային էլեկտրաձգնիսական ալիքննչով արագագման նպատակների համար, նյութերի ընտրության մեթոդերյալ: Կազմվել է հեռանկարային նյութերի համակուձյունների մեթոդերյալ քարտագուգակ:

Երևանի Ֆիզիկայի ինստիտուտ

Երևան 1986

Preprint EOM-874(25)-86

S.G. ARUTYUNYAN, N.G. TER-ARUTYUNYAN-SAVVIDY

MATERIALS FOR ACCELERATION BY
SURFACE ELECTROMAGNETIC WAVES

Recommendations to the choice of materials for acceleration by surface electromagnetic waves are elaborated on the basis of a great number of studied literature on optical resistance. A catalog of properties of materials perspective for the use in this purpose is made up.

Yerevan Physics Institute

Yerevan 1986

Препринт ЕФИ-874(25)-86

УДК 538.9.004.74:535.39:621.378.325:621.384.6

С. Г. АРУТЮНЯН, Н. Г. ТЕР-АРУТЮНЯН-САВВИДИ

**МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ УСКОРЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫМИ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ВОЛНАМИ**

На основе изучения большого количества литературы по оптической прочности разработаны рекомендации по выбору материалов для целей ускорения поверхностными электромагнитными волнами. Составлен каталог свойств материалов, перспективных для использования в этих целях.

Ереванский физический институт

Ереван 1986

1. Введение

Темп ускорения заряженных частиц при использовании ускоряющих металлических резонаторов ограничивается величиной пробойного поля ~ 1 МэВ/см [1]. Современные лазерные источники электромагнитного излучения создают потоки энергии в фокусе вплоть до $10^{15}-10^{16}$ Вт/см² [2], что соответствует гораздо большим напряженностям поля $\sim 10^8-10^9$ В/см. Непосредственное использование таких полей, невозможно, так как для резонансного ускорения требуется также играющее роль волновода третье тело, замедляющее фазовую скорость волны [3]. Снова возникает проблема неразрушения ускоряющей структуры, однако, так как рассматривается оптический диапазон длин волн и в качестве третьего тела могут использоваться диэлектрики и полупроводники, этот вопрос требует специального рассмотрения.

В схеме ускорения частиц поверхностными электромагнитными волнами (ПЭВ), создаваемыми при полном внутреннем отражении, предельный темп ускорения ограничивается потоками излучения, при которых разрушается диэлектрический резонатор ПЭВ. В качестве материала для изготовления такого резонатора следует использовать вещества с рекордными значениями лучевой прочности $\sim 10^{12}$ Вт/см². Предварительные оценки показывают, что соответ-

ствующий темп ускорения более чем на порядок превосходит темп ускорения в металлических резонаторах.

2. Лучевая прочность материалов

Для ускорения частиц ПЭВ над поверхностью диэлектриков основным параметром рабочей среды является лучевая прочность вещества. Для лазерного ускорения допустимо получение ПЭВ на поверхности взрывающегося в дальнейшем диэлектрика лишь в течение нескольких периодов волны. Послепробойное, звуковое разрушение вещества не повлияло бы на процесс ускорения и потребовало бы лишь смены ускоряющей дорожки. В работе [4], например, выяснено, что при действии излучения рубинового лазера на рубин механическое разрушение наступает после ухода ударной волны с задержкой во времени более 10 нс, но возможно наблюдение нелинейных эффектов типа вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна, порог которых выше порога разрушения, но время установления меньше 10 нс. Уже в течение пикосекундных лазерных импульсов пробойная лавина свободных электронов успевает искажать диэлектрические свойства среды. Возможно, следует использовать более короткие импульсы. Кроме того, есть смысл подбирать среды с такими начальными параметрами, изменение которых при лазерном разрушении создавало бы диэлектрические свойства, обеспечивающие получение ускоряющих ПЭВ. Обзор по оптической прочности веществ мы проводим в основном по работам, исследующим этот аспект с точки зрения создания мощных лазеров.

3. Предельные механизмы разрушения

Основными механизмами, стимулирующими разрушение предельно

чистых материалов, являются лавинная ионизация и даже многофотонная ионизация атомов решетки. Поглощение лазерного излучения на свободных электронах приводит к локальному разогреву и звуковому высвобождению накопленных термоупругих напряжений.

В [5] пороговая напряженность светового поля оценена из условия сравнимости набора энергии под действием светового поля на свободные электроны с потерями их энергии на взаимодействие с фононами при энергии электрона порядка потенциала ионизации φ . Предполагается, что время развития лавины меньше длительности лазерного импульса (в данной работе используются импульсы от 15 до 60 нс). В более коротких импульсах лавина, однако, не успевает развиться. Критическое значение плотности свободных электронов оценивается $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ [6] и определяет зависимость порогового значения поля от длительности импульса [7]:

$$E_{\text{пор}}^2 \tau = \text{const.}$$

Существенным для начала развития лавины является наличие в объеме каустики свободных - "счастливых" (по терминологии работы [8]) электронов. Именно это обстоятельство приводит к статистическому характеру порога лавинной ионизации [9, 10]. В работе [11] на образцах, выращенных в ИК АН СССР, были получены предельные пороги разрушения для кристаллов NaF и LiF, соответственно, $1,4 \cdot 10^{11} \text{ Вт/см}^2$ и $3,6 \cdot 10^{11} \text{ Вт/см}^2$ для длительности импульса ~ 10 нс.

Для многофотонной ионизации необходимые потоки энергии, по-видимому, выше порога разрушения для лавинной ионизации. В [12] приводится величина потока $P \sim 1,1 \cdot 10^{15} \text{ Вт/см}^2$ для импульса длительностью 28 нс с размерами каустики ~ 28 мкм, необходимая для наблюдения эффектов многофотонной ионизации отдельного атома.

4. Пробой несовершенных диэлектриков

Предельные механизмы, как правило, не реализуются из-за несовершенства образцов. Концентрация дефектов и включений особенно велика на поверхности материала, что приводит к снижению величины поля для поверхностного пробоя по сравнению с объемным.

В [11,13] обнаружено увеличение порога поверхностного пробоя щелочно-галогидных кристаллов на длине волны ~ 1 мкм после их термической обработки. Повышение порога пробоя примерно на порядок, по-видимому, связано с испарением адсорбированных на поверхности веществ и растворимостью примесных атомов и включений по объему кристаллов.

Реадсорбцию поверхностных включений можно производить также с помощью самих лазеров. Такая очистка поверхности образцов рядом предпробойных импульсов также увеличивает лучевую прочность материалов [14].

Заметим, что получение и сохранение поверхностей стабильно высокого оптического качества возможно при выращивании и выдерживании образцов в постоянном вакууме. Только в таких условиях пороги поверхностного пробоя могут сравниваться с объемными [15].

Определяющая роль включений и дефектов в оптическом пробое материалов видна при наблюдении так называемого "размерного эффекта", когда порог разрушения зависит от размеров каустики.

В [16] приводятся данные о том, что в зависимости от условий фокусировки порог меняется от $0,1$ ГВт/см² до 100 ГВт/см². В [17] исследовалось разрушение кристаллов KN_2PO_4 (KDP) и LiNbO_3 излучением лазера на рубине (длительность импульса - 14 и 22 пс).

при разных фокусных расстояниях ($f = 8$ и 3 см). Для LiNbO_3 порог пробоя менялся от $0,062$ ГВт/см² до $0,41$ ГВт/см². Наблюдение "размерного эффекта" позволяет также оценить характерные длины оптической неоднородности и плотность включений. В объемах $\sim 10^{-8}$ – 10^{-9} см³, свободных от кластерных включений, могут реализоваться предельные механизмы разрушения (лавинная ионизация). С целью избежать влияния поглощающих включений следует использовать острофокусированные пучки, когда интенсивное излучение сосредоточено именно в таких объемах.

Чистота образцов по включениям, по-видимому, должна сравниваться с плотностью электронов в зоне проводимости при заданной температуре. Характерным является поиск корреляций лучевой прочности со структурой дефектов, плотностью и размерами инородных включений.

5. Корреляция лучевой прочности

с характеристиками лазерного излучения

Четкой зависимости порога пробоя с длиной волны в области ~ 1 мкм установлено не было – лучевая прочность уменьшалась в ультрафиолетовом диапазоне [18,19].

При исследовании разрушения материалов использовались разные режимы генерации лазерного излучения. Для острофокусированного многомодового излучения объем фокальной области $\sim 10^{-5}$ см³, и в нем с высокой вероятностью находится микровключение. При острой фокусировке одномодового излучения интенсивность излучения 10^{10} – 10^{12} Вт/см² достигается в объемах порядка 10^{-8} см³, что близко к величине, обратной концентрации микровключений [20]. Порог лазерного разрушения выбранного материала растет с уменьшением длительности импульса. Некоторые данные [19,21,22] по зависимости пробойного поля от длительности лазерного импуль-

са приведены в логарифмическом по обеим осям масштабе на рис.1. Примерная аппроксимация экспериментальных точек прямыми определяет тангенс угла наклона для них $k \sim (-0,2-0,4)$; $E_{пор} \sim \tau^k$. С появлением кольцевых лазеров с перестройкой длительности импульса от 1 пс до 55 фс [23,24] возникает необходимость оценки порога разрушения для фемтосекундных импульсов. Экстраполяция таких прямых в область фемтосекундных импульсов (~ 50 фс) дает значения для порогового поля до 10^8 В/см.

Возможно существенное отклонение реальной зависимости от экстраполированных прямых при длительностях импульса $< 10^{-13}$ с из-за того, что в этих случаях, даже если и возникает лавина, то не успевают происходить электронно-фононные столкновения; в результате поглощенная энергия не передается решетке, и разрушения не происходит.

Зависимость пробойных порогов от количества лазерных импульсов в [3] аппроксимировалась выражением $E \approx M^{-1/2}$, где M - количество выстрелов, $\tau = 2,45$.

Для целей ускорения ПЭВ существенно изучение динамики разрушения в течение импульса.

6. Данные по лучевой и механической прочности материалов

В табл.1 и 2 собраны данные по свойствам материалов, перспективных для применения в качестве ускоряющей диэлектрической дорожки. В табл.1 приведены данные по оптической прочности материалов, а в табл.2 - по упругим, оптическим и другим свойствам [8,25,26]. а также краткие сведения по оптической прочности

на основе данных табл. I (выбраны наибольшие значения порогов и преимущественно на длинах волн ~ 1 мкм и при длительностях импульсов $\approx 1-100$ нс).

7. Выводы

7.1. Чувствительность оптической прочности к включениям и дефектам размерами $\sim 0,01-1$ мкм требует разработки субмикронных критериев и методов контроля чистоты образцов. Зависимость лучевой прочности от характера дефектов и включений не всегда ясна. Увеличения порога для конкретных образцов можно добиться специальной поверхностной и термической обработкой вещества, облучением образцов гамма-излучением и др.

Существенно предотвращение адсорбции поверхности образца инородными веществами (например, водой для щелочно-галогидных кристаллов), что требует обработки материалов и монтажа диэлектрической дорожки в вакууме.

7.2. Материалами, совершенными с точки зрения лазерного разрушения, оказались вещества, для которых порог пробоя имеет нестатистический характер (отсутствует разброс в зависимости от точки образца, размеров каустики при равных потоках энергии излучения, условий фокусировки). В этих случаях экспериментально достигались предельные значения порога разрушения $\sim 10^{12}$ Вт/см². Теория оптической прочности даже таких идеальных веществ далека от завершения - исследование процесса пробоя должно оперировать в итоге небольшим количеством упругих констант вещества (примечательна, например, связь между порогом пробоя и модулем Юнга (см. рис. 2)).

7.3. Работы по изучению оптической прочности материалов в ос-

новном стимулировались созданием мощных лазеров, т.е. исследовались вопросы получения веществ со стабильно высокими значениями лучевой прочности. Хотя динамика разрушения исследовалась в ряде работ, однако временное разрешение процессов разрушения ограничивалось в лучшем случае пикосекундными интервалами. Поскольку повторяемость вспышек лазерного излучения меньше этой величины, то детализация процесса разрушения в субпикосекундном диапазоне не представляла физического интереса. Для целей ускорения, однако, допустимо получение ПЭВ на поверхности разрушающегося в дальнейшем диэлектрика лишь в течение нескольких периодов волны. Следовательно, для длительностей импульсов лазерного излучения субпикосекундного диапазона (либо для импульсов с такой шириной фронта) следует различать разрушение, наступающее после прохождения импульса от разрушения в течение времени порядка или меньше самого импульса. Порог такого субпикосекундного разрушения, по-видимому, окажется выше, чем значение, экстраполированное по данным на рис. I.

В заключение авторы выражают благодарность Нагорскому Г.А. за стимулирование работы и неоднократные обсуждения, Амату - ни А.Ц. за постоянное внимание к работе, обсуждения и полезные замечания, Айрумяну М.Б. за большую помощь в поисках литературы.

Таблица I

Данные по оптической прочности материалов

Вещество	Длина волны, (мкм)	Время (нс)	Порог поверхностного разрушения (ГВт/см ²)	Порог объемного разрушения (ГВт/см ²)	№ ссылки	
I	2	3	4	5	6	
1. α - Al_2O_3 (лейкосап-фир)	1,06	30	0,47		[30]	
	0,69	I	400		[31]	
	1,06	15		1600	[29]	
	1,06	10		400	[13]	
	1,06	10		105	[32]	
	0,63	2,5-7		130кВт	[33]	
	1,06	10		210	[34]	
	1,06	30		25	[5]	
	0,69	20		38	"	
	0,53	20		15	"	
	0,35	15		20	"	
	2. α - Al_2O_3 (рубин)	1,06	10		30	[4]
		1,06	30		23	[5]
0,69		20		28	"	
0,53		20		4	"	
0,35		15		10	"	
3. BaF_2	10,6	150	0,047		[14]	
	1,06	10		150	[13]	
	10,6	150		I	[14]	
4. $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$ (банан)	1,06	12		6,4	[9]	
5. CaF_2	0,69	I	300		[35]	
	1,06	10		200	[13]	
6. CdSe	10,6	60		1,4	[15]	
7. CdTe	10,6	60		0,6	"	
8. CsBz	10,6	10		27	[13]	
9. CsI	1,06	10		12	"	
10. CaAs	1,06	17,5	0,04		[36]	

I	2	3	4	5	6
	10,6	200	0,1		[36]
	10,6	60		53,6	[15]
II. Ge	10,6	150	0,05		[14]
12. KBz	1,06	10		50	[13]
	10,6	92000		7,8	[38]
	10,6	100-200		0,14	[39]
	1,06	4,7		2,3	[8]
	10,6	14		2,3	"-
13. KCl	10,6	150	0,06		[14]
	1,06	15		80	[29]
	1,06	10		70	[13]
	10,6	150		0,3	[14]
	10,6	92		8,7	[38]
	10,6	100-200		0,08	[39]
	1,06	10		8,3	[34]
	1,06	4,7		4,6	[8]
	10,6	14		5	"-
	1,06	10	30		[11]
I4. KF	10,6	14		15,2	[8]
15. KH ₂ PO ₄ (KDP)	1,06	7	2,7		[40]
	0,69	14		0,16 (z-срез, f=8 см, МНОГОМОД.)	[17]
	0,69	14		1,15 (x-срез, f=3 см, МНОГОМОД.)	"-
	0,69	14		0,15 (x-срез, f=8 см, МНОГОМОД.)	"-
	0,69	22		1,25 (z-срез, f=8 см, МНОГОМОД.)	"-
	1,06	4,7		16,6 (одномод.)	[10]
	0,69	14		27,6	"-
	1,06	12		14,4	[9]
	1,06	0,01		7 · 10 ⁴ Дж	[41]
	0,53	0,01		7 · 10 ⁵ Дж	"-
I6. KI	1,06	10		22	[13]
	1,06	4,7		1	[8]
	10,6	14		1,4	"-

I	2	3	4	5	6
17. Li IO ₃	1,06	10		30	[13]
	1,06	4,7		2,8	[10]
	0,69	14		3,9	-"-
	1,06	12		3,2	[9]
	1,06	20		2,6	[42]
18. Li NBO ₃	1,06	7	5,3		[40]
	1,06	10	0,25		[43]
	1,06	10	120		[44]
	1,06	4,7		11,1	[10]
	0,69	14		11,1	-"-
	1,06	12		11,1	[9]
	19. Li F	0,69	I	100	
1,06		10		360	[13]
20. Mg F ₂	0,69	I	420		[31]
21. Mg O	0,69	I	100		-"-
22. Na Bz	1,06	4,7		6,3	[8]
	10,6	14		2,3	-"-
23. NaCl	10,6	150	0,09		[14]
	1,06	15		98	[29]
	1,06	10		120	[13]
	10,6	150		0,5	[14]
	10,6	92		3,3	[38]
	10,6	100-200		0,12	[39]
	1,06	I		34	[18]
	0,53	I		22,3	-"-
	0,35	I		34	-"-
	0,26	I		0,7	-"-
	1,06	10		2,65	[22]
	1,06	0,015		265	-"-
	1,06	4,7		14	[8]
	10,6	14		10	-"-
	24. NaF	10,6	150	0,07	
1,06		10		140	[13]
10,6		150		0,3	[14]
25. NaJ	1,06	4,7		38	[8]
	1,06	4,7		1,8	-"-
	10,6	14		1,7	-"-

I	2	3	4	5	6
26. $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ (ЯДР)	I,06	I2		6,4	[9]
27. RbVz	I,06	4,7		3,4	[8]
	IO,6	I4		2	-"-
28. RbCe	I,06	IO		6	[I3]
	I,06	4,7		6,3	[8]
	IO,6	I4		2,2	-"-
29. RbI	I,06	4,7		2,2	-"-
	IO,6	I4		I,7	-"-
30. Si	IO,6	IOO		3	[37]
	2,94	$(I-2) \cdot IO^5$		0,5-0,3	[I5]
	2,76	IOO		2,3	-"-
	IO,6	60		5	-"-
31. SiO_2 (кварц кристалли- ческий)	0,69	I	250		[3I]
	I,06	IO		230	[I3]
	I,06	4,7		5,4	[IO]
	0,69	I4		20,2	-"-
	I,06	I2		6,4	[9]
	0,63	I,4-7		II0 кВт	[33]
	I,06	I		448	[I8]
	0,53	I		5I9	-"-
	0,35	I		32I	-"-
	0,26	I		382	-"-
32. SiO_2 (кварц плавильный)	0,69	I	420		[3I]
	I,06	I2		24	[9]
	I,06	IO		72	[32]
	I,06	IO		I4I	[45]
	I,06	I		32I	[I8]
	0,53	I		766	-"-
	0,35	I		32I	-"-
	0,26	I		32I	-"-
	I,06	IO		IO8	[34]
	I,06	IO		400	[I3]
33. 75% SiO_2 , 22% Na_2O , 0,3% CaO (силикатное кronовое стекло)	I,06	20		IOO	[46]

1	2	3	4	5	6
34. $SrTiO_3$	1,06	4,7		0,8	[10]
	0,69	14		15,3	-"-
	1,06	12		6,4	[9]
35. Te	10,6	100	0,063		[36]
36. TiO_2	0,69	1	180		[31]
37. $TlVz-TlI$ (KPC-5)	10,6	150	0,06		[14]
	10,6	250	$0,07 \pm 0,04$		[47]
	10,6	150		0,09	[14]
	10,6	250		16 ± 2	[47]
38. $TlVz-TlSe$ (KPC-6)	10,6	150	0,04		[14]
	10,6	250	$0,03 - 0,02$		[47]
	10,6	150		0,11	[29]
	10,6	250		$0,1 \pm 0,01$	[47]
39. ZrO_2	0,69	1	280		[31]
40. Стекло ГЛС-1	1,06	0,09	10-20		[48]
	1,06	40	0,8		-"-
	1,06	$4 \cdot 10^6$	$4,8 \cdot 10^{-8}$		-"-
	1,06	10^7	$1,5 \cdot 10^{-8}$		-"-
41. ИАГ-Nd	1,06	10		0,6	[43]
	1,06	10		67 (ос- тр. фо- кус)	-"-
42. Стекло К-8	1,06	$8 \cdot 10^5$	500 Дж		[49]
	1,06	15	1		[25]
	0,53	15	1		-"-
	1,06	40	1,4		[48]
	1,06	$4 \cdot 10^4$	0,05		-"-
	1,06	10^6	$8 \cdot 10^{-8}$		-"-
	1,06	10^7	$2,5 \cdot 10^{-8}$		-"-
	0,63	1,4-7			100 кВт [33]
	1,06	15			1 [25]
	0,53	15			1 -"-
	1,06	15			350 [29]

Таблица 2

Данные по свойствам материалов

Вещество	Модуль Юнга, (10^{11} дин/см ²)	Коэффициент Пуассона	Диапазон прозрачности (мкм)	Показатель преломления	Коэффициент поглощения (см ⁻¹)	Пробой в постоянном электрическом поле (ГВТ/см ²)	Порог поверхностного разрушения (ГВТ/см ²)	Порог объемного разрушения (ГВТ/см ²)
1. α - Al_2O_3 (лейкосап-фир)	46,06-48,45	0,233-0,237	0,17-6,5	1,75547			0,47	1600
2. α - Al_2O_3 (рубин)	39,56-40,27	0,233-0,237	0,15-15	1,46847	0,09			30
3. BaF_2			0,4-5	$n_1=2,258$ $n_2=2,527$ $n_3=2,170$				150
4. $\text{Ba}_2\text{NaNbO}_6$ (банан)			0,125-10	1,42884				6,4
5. CaF_2	9,17-14,08	0,281-0,305	0,75-25	$n_0=2,550$ $n_1=2,570$				200
6. CdSe			0,21-5,5	1,679	0,1			1,4
7. CdTe		0,253	0,25-64	1,758	1,944			0,6
8. CsBr	1,6	0,254	I-15	3,4	0,025		0,04	27
9. CsI	1,5-1,83	0,244	I,5-22	4,143	10 ⁻⁴		0,05	12
10. GaO_3	11,6	0,208	0,2-42	1,544		0,69		53,6
11. Ge	12,8-13,46	0,283						50
12. KBr	2,01-3,2							

I	2	3	4	5	6	7	8	9
13. KCl	2,39-7	0,268-0,77	0,21-30	1,48	10 ⁻⁵	I		80
14. KF	4,31	0,274		$n_o=1,4956$ $n_e=1,4606$	0,03	I,9	2,7	15,2 27,6
15. KH ₂ PO ₄ (KDP)	3,5-3,88	0,258-0,339	0,25-1,7	$n_o=1,641$ $n_e=1,86$ $n_e=1,719$	0,57			22 30
16. KI	1,204-2,71	0,271-0,291	0,2-50	$n_o=2,2407$ $n_e=2,1580$			120	11,1
17. LiIO ₃			0,3-6	I,387				360
18. LiNbO ₃	13,14-16,82		0,4-4,5					
19. LiF	8,85-14,35	0,192-0,217	0,65-II	I,7226			420 Дж/см ² 100 Дж/см ²	
20. MgF ₂								
21. MgO	23,99-31,19	0,172-0,187	0,25-8,5	I,532	10 ⁻⁸	0,8	0,09	6,3 265
22. NaBz	2,86-2,92	0,254-0,269	0,185-17	I,3214		1,5		140
23. NaCl	3,3-4,3	0,231-0,256	0,15-17	I,748		2,4		1,8
24. NaF	7,69	0,236	0,25-40	$n_o=1,505$ $n_e=1,468$		0,1		6,4
25. NaI	2,053-2,593	0,262-0,277	0,2-1,87			0,6		3,4
26. NH ₄ H ₂ P ₂ O ₇ (ADP)	2,78-3	0,275-0,329				0,83		6,3
27. RbBz	1,67-1,69	0,296-0,297				0,5		2,2
28. RbCl	2	0,294				0,098		5
29. RbI	1,28-1,31	0,304-0,309				4,6-6,7		448
30. Si	13-19	0,223	1,5-10	3,565				
31. SiO ₂ (кварц кристаллический)	9,56-9,57	0,063-0,078	0,15-4,5	$n_o=1,535$ $n_e=1,544$			250	

I	2	3	4	5	6	7	8	9
32. SiO ₂ кварц (плавленый)		0,172				4,6-6,7	420	766
33. 75%SiO ₂ 22%Na ₂ O 0,5%CaO (СИЛ- катное крано- вое стекло)								I00
34. SrTiO ₃			0,39-6,8	2,3I47			0,063	I5,3
35. Te			5-20	6,34			I80	
36. TiO ₂	27,75-28,94	0,276-0,283	0,4-6,2	2,5495			0,06	I6
37. TeBr ₂ -TeI (KPC-5)	2,94-3,138	0,25-0,4	0,53-50	2,444I6		(4-6) · 10 ⁻⁴		
38. TeBr ₂ -TeSeI (KPC-6)	2,648-3,776	0,22-0,4	0,4-30	2,2404		(4-5) · 10 ⁻⁴	0,04	0,II
39. ZrO ₂							280	
40. Стекло ПГ-1							20	
41. МАГ-Nd				I,829				67
42. Стекло К-8							I,4	350

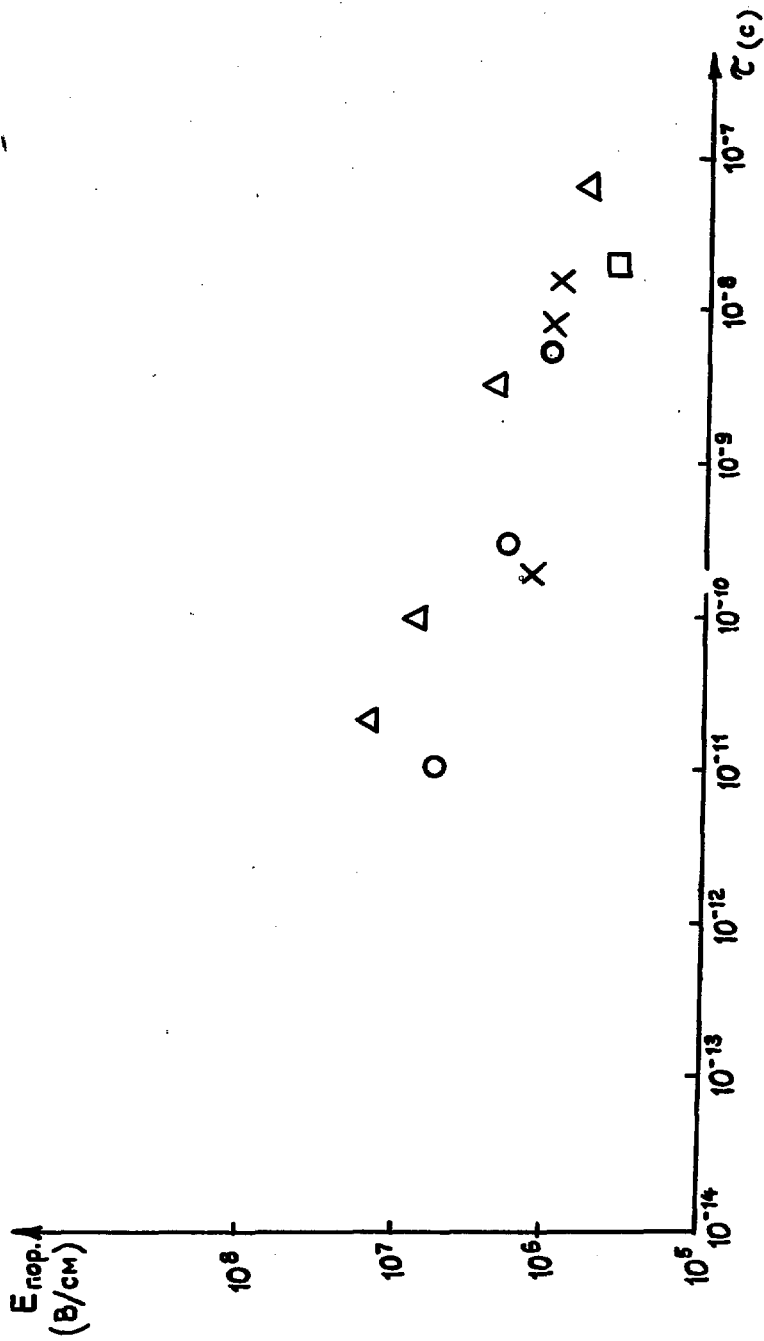


Рис.1 Временная зависимость порогового поля от длительности лазерного импульса: \circ - [21]; Δ - [27]; \times - [22]; \square - [28]. Данные приведены в относительных единицах

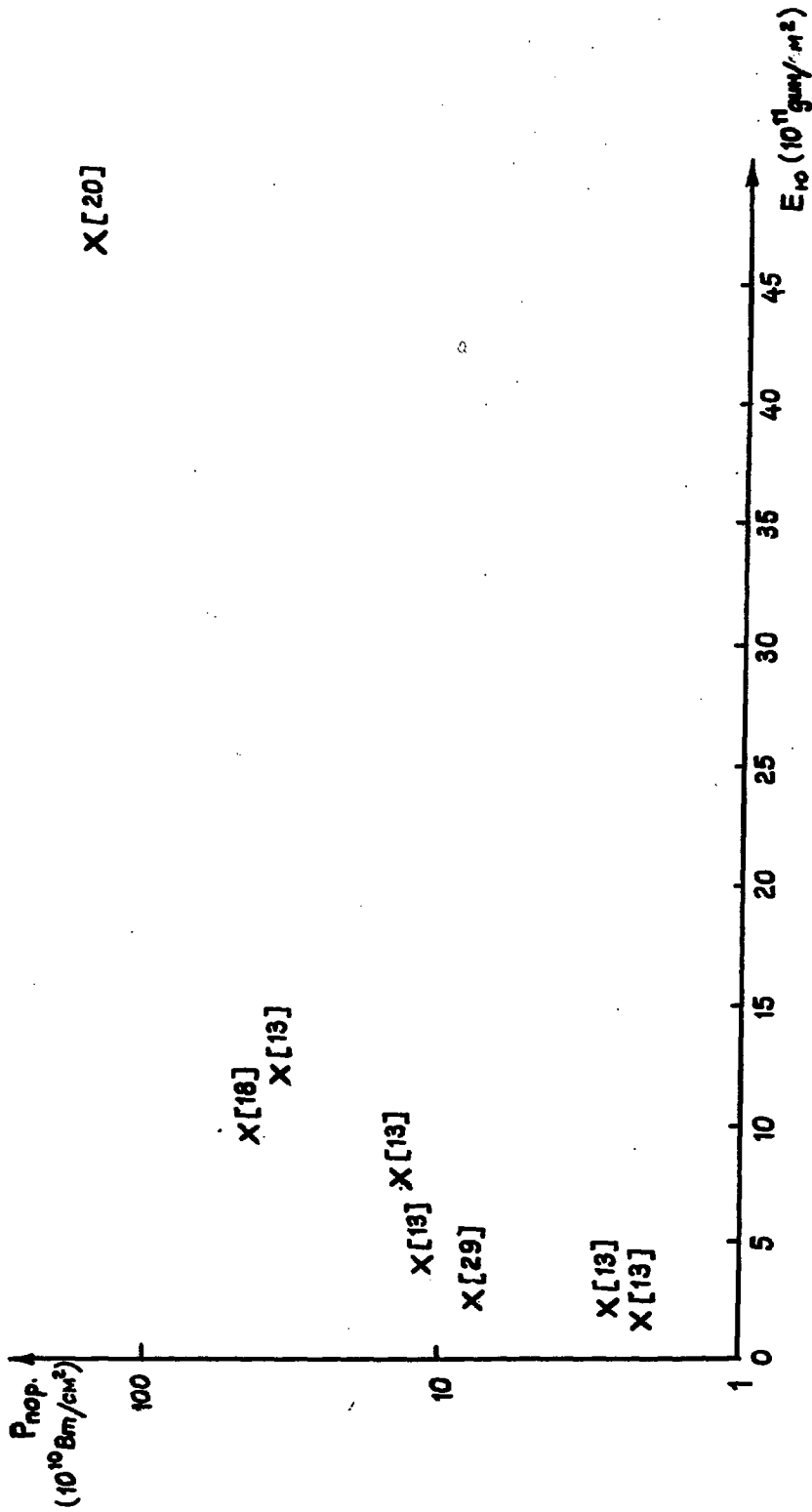


Рис.2. Связь между предельными значениями порога и модулем Юнга

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балакия В.Е., Брежнев О.Н., Новохатский А.В., Семенов Ю.И.
Ускоряющая структура ВЛЭППа. Исследование максимально достижимого темпа ускорения. В кн.: Труды VI Всесоюзного совещания по ускорению заряженных частиц. Дубна, 11-13 октября 1978г., т. I, Дубна, 1979.
2. Калинин А.В. Реакторы инерциального термоядерного синтеза (обзор). Квантовая электроника, 1984, т. II, № 3, с. 439-457.
3. Nagorsky N.A., Amatuni A.Ts., Harutimian W.M. Resonance acceleration of charged particles by a surface wave arising at total internal reflection.- Preprint EPI-589(76), Yerevan, 1982.
4. Беликова Т.П., Савченко А.Н., Свириденков Э.А. Поглощение света рубином в предпробойном состоянии. ЖЭФ, 1970, т. 58, вып. 6(6), с. 1899-1903.
5. Зверев Г.М., Михайлова Т.Н., Пашков В.А. и др. О механизмах разрушения кристаллов рубина и лейкосапфира мощным лазерным излучением. ЖЭФ, 1967, т. 53, вып. 6(12), с. 1849-1857.
6. Бломбергс Н. Электрический пробой в твердых телах под действием лазерного излучения. Квантовая электроника, 1974, т. I, с. 786-805.
7. Молчанов А.Г. Развитие лавинной ионизации в прозрачных диэлектриках под действием импульсов света. ФТТ, 1970, т. 12, с. 954-956.

8. Pradin D.W., Yablonovitch E., Bass M. Confirmation of an electron avalanche causing laser-induced bulk damage at $1.06 \mu\text{m}$. Appl.Opt., 1973, vol.12, N.4, p.700-709.
9. Bass M., Barret H.H. Avalanche breakdown and the probabilistic nature of laser-induced damage. IEEE J. Quantum Electronics, 1972, vol.QE-8, N.3, p.338-343.
10. Bass M., Barret H.H. Laser-induced damage probability at $1.06 \mu\text{m}$ and $0.69 \mu\text{m}$. Appl.Opt., 1973, vol.12, N.4, p.690-699.
11. Горшков Б.Г., Данилейко Ю.Г., Епифанов А.С. и др. Лазерное разрушение щелочно-галогидных кристаллов. ЖЭТФ, 1977, т.72, вып.3, с.1171-1181.
12. Lompre L.A., Mainfray G., Manus C. et al. Multiphoton ionisation of rare gases at very high laser intensity (10^{15}W/cm^2) by a 30-psec laser pulse at $1.06 \mu\text{m}$. Phys.Rev.Lett., 1976, vol.36, p.949.
13. Горшков Б.Г. Исследование механизмов разрушения ионных кристаллов под действием импульсного лазерного излучения наносекундного диапазона. В кн.: Метод МБР в квантовой электронике и лазерное разрушение. М.: Наука, 1982, с.81-134. (Труды ФИАН; т.137).
14. Ковалев В.И. Исследование механизма пробоя на поверхности материалов ИК-оптики под действием излучения импульсного CO_2 - лазера. В кн.: Инфракрасные лазеры с когерентной накачкой и лучевая стойкость оптических материалов. М.: Наука, 1982, с.51-117. (Труды ФИАН; т.136).

15. Сидорин А.В. Исследование процессов объемного разрушения полупроводников под действием импульсного лазерного излучения инфракрасного диапазона. В кн.: Метод МБР в квантовой электронике и лазерное разрушение. М.: Наука, 1982, с.135-190. (Труды ФАН, т.137).
16. Бессонова Т.С., Данилейко Ю.К., Николаев В.Н., Сидорин А.В. О лазерной прочности кристаллов LiF . Квантовая электроника, 1981, т.8, № 10, с.2262-2263.
17. Ананьин О.Б., Быковский Ю.А., Петровский А.Н., Рез И.С. Разрушение нелинейных кристаллов KDP и $LiNbO_3$ излучением лазера на рубине. ЖТФ, 1972, т.42, вып.4, с.837-840.
18. Алешкевич В.А., Ахманов С.А., Жданов Б.В. и др. Исследование частотных характеристик оптического пробоя твердых прозрачных диэлектриков в поле наносекундных лазерных импульсов. ЖТФ, 1976, т.46, вып.8, с.1693-1699.
19. Rainer P., Lowdermilk W.H., Milam D. Bulk and surface damage thresholds of crystals and glasses at 248 nm Opt. Eng., 1983, vol.22, N.4, p.431-434.
20. Горшков Б.Г., Данилейко Ю.К., Николаев В.Н., Сидорин А.В. Эффект многократного воздействия в лазерном разрушении оптических материалов. Квантовая электроника, 1983, т.10, № 3, с.640-643.
21. Епифанов А.С., Маненков А.А., Прохоров А.М. Теория лавинной ионизации в твердых телах под действием электромагнитного поля. В кн.: Лазерное разрушение и рассеяние света в твердых прозрачных диэлектриках. М.: Наука, 1978, с.87-129. Труды ФАН. * 107).

22. Fradin D.W., Bloembergen N., Letellier J.P. Dependence of laser-induced breakdown field strength on pulse duration. Appl. Phys. Lett., 1973, vol.22, p.635-637.
23. Soileau M.J., Williams W.E., Van Stryland E.W. et al. Pico-second damage studies at 0.5 and 1 μm . Opt.Eng., 1983, vol.22, N.4, p.424-430.
24. Дилс Е.-К., Фонтейн Ж.Ж., Макмихаэль И.Ч. и др. Экспериментальное и теоретическое исследование фемтосекундного лазера. Квантовая электроника, 1983, т.10, № 12, с.2398-2410.
25. Альтшулер Г.Б., Баханов В.А., Дульнева Е.Г. и др. Исследование оптического пробоя в кварцевых микропористых стеклах. ЖТФ, 1984, т.54, вып.1, с.183-185.
26. Акустические кристаллы. Справочник / Блистанов А.А., Бондаренко В.С., Чкалова В.В. и др.: под ред. Шаскольской М.П. М.: Наука, 1982.
27. Ready J.E. Industrial applications of lasers. Academic Press, N.Y., San-Francisco, London, 1978.
28. Данилейко Ю.К., Маненков А.А., Прохоров А.М., Хаимов-Мальков В.Л. Поверхностное разрушение лазерных кристаллов рубина. В кн.: Лазерное разрушение и рассеяние света в твердых прозрачных диэлектриках. М.: Наука, 1978, с.9-30. (Труды ФИАН; т.101).
29. Данилейко Ю.К., Минаев Ю.П., Николаев В.Н., Сидорин А.В. Определение характеристик микродефектов по статистическим закономерностям лазерного разрушения твердых прозрачных материалов. Квантовая электроника, 1981, т.8, № 11, с.2362-2370.

30. Boling N.L., Dube G. Laser-induced inclusion damage at surfaces of transparent dielectrics.- Appl. Phys.Lett., 1973, vol.23, N.12, p.658-660.
31. Glass A.J., Guenther A.H. Laser induced damage of optical elements - a status report. Appl. Opt., 1973, vol.12, N.4, p.637-649.
32. Fradin D.W., Bass M. Comparison of laser-induced surface and bulk damage. Appl.Phys.Lett., 1973, vol.22, N.4, p.157-159.
33. Данилейко Ю.К., Маненков А.А., Нечитайло В.С. Исследование объемного лазерного разрушения и рассеяние света в кристаллах и стеклах. В кн.: Лазерное разрушение и рассеяние света в твердых прозрачных диэлектриках. М.: Наука, 1978, с.31-74. (Труды ФИАН, т.101).
34. Fradin D.W., Bass M. Effects of lattice disorder on the intrinsic optical damage fields of solids. Appl. Phys. Lett., 1973, vol.23, N.11, p.604-606.
35. Hopper R.W., Uhlmann D.R. Mechanism of inclusion damage in laser glass. J.Appl.Phys., 1970, vol.41, N.10, p.4023-4037.
36. Hanna D.C., Luther-Davies, Rutt H.W. et al. Q-switched laser damage of infrared nonlinear materials. IEEE J. Quantum Electronics, 1972, vol.QE-8, N.3, p.317-324

37. Данилейко Ю.К., Сидорин А.В. Связь статистики лазерного разрушения твердых прозрачных материалов со статистикой структурных дефектов. Квантовая электроника, 1979, т.6, № 12, с.2590-2596.
38. Карлов Н.В., Сисакян Е.В. Оптические материалы для CO₂-лазеров. Известия АН СССР, сер. физ., 1980, т.44, № 8, с. 1631-1638.
39. Крутякова В.П., Смирнов Е.Н. Свечение щелочно-галлоидных кристаллов под действием импульсов излучения с $\lambda = 10,6$ мкм. ЖТФ, 1978, т.48, вып.4, с.844-852.
40. Baes M. Nd: YAG laser-irradiation-induced damage to LiNbO₃ and KDP. IEEE J. Quantum Electronics, 1971, vol.QE-7, N.7, p.350-359.
41. Гридин В.А., Кротов В.А., Петровский А.Н. Разрушение кристаллов KDP ультракороткими лазерными импульсами. Квантовая электроника, 1976, т.3, № 2, с.311-315.
42. Glass A.J., Guenther A.H. Laser induced damage to optical materials, 1973: a conference report. Appl. Opt., 1974, vol.13, N.1, p.74-88.
43. Зверев Г.М. Материалы для квантовой электроники (иттриво-алюминиевый гранат, ниобат лития). Известия АН СССР, сер. физ., 1980, т.44, № 8, с.1614-1621.
44. Зверев Г.М., Наумов В.С., Пашков В.А. и др. Особенности лазерного повреждения сегнетоэлектрических кристаллов. Изв. АН СССР, сер. физ., 1982, т. 46, № 6, с.1135-1140.

45. Bass M., Fradin D.W. Surface and bulk laser-damage statistics and the identification of intrinsic breakdown processes. IEEE J. Quantum Electronics, 1975, vol. QE-9, N.9, p.890-896.
46. Гагарин А.П., Глебов Л.Б., Докучаев В.Г. и др. Влияние поглощающих примесей на оптический пробой прозрачных диэлектриков. ЖТФ, 1982, т.52, вып.1, с.101-104.
47. Дарвойд Т.И., Карлова Е.К., Карлов Н.В. и др. Исследование некоторых свойств кристаллов КРС в 10-микронной области спектра. Квантовая электроника, 1975, т.2, № 4, с.765-772.
48. Бужинский И.М., Поздняков А.Е. О связи между порогами разрушения стекла лазерными импульсами различной длительности. Квантовая электроника, 1975, т.2, № 7, с.1550-1552.
49. Алешин И.В., Бонч-Бруевич А.М., Имас Я.А. и др. К вопросу о поверхностном разрушении оптического стекла К-8. ЖТФ, 1971, т.41, вып.4, с.820-823.

Рукопись поступила 10 декабря 1985 г.

С. Г. АРУТЮНЯН, Н. Г. ТЕР-АРУТЮНЯН-САВЕЛИ

**МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ УСКОРЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ
ВОЛНАМИ**

Редактор Л. П. Мукаян

Технический редактор А. С. Абрамян

Подписано в печать II/У-86г.

Офсетная печать. Уч. изд. л. I,5

Зак. тип. № 285

ВФ-05508 формат 60x84/16

Тираж 299 экз. Ц. 22 к.

Индекс 3624

Отпечатано в Ереванском физическом институте

Ереван 36, Маркаряна 2

индекс 3624



ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ