

Глава 5. ОПТИЧЕСКИЕ СТЕКЛА И ИХ РАДИАЦИОННО-ОПТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ

Модельные стекла, т. е. стекла сравнительно простых составов, радиационно-оптические свойства которых были рассмотрены в предыдущей главе, никогда не используются в оптическом приборостроении. Причина этого состоит в том, что к стеклам для оптических приборов одновременно предъявляется большое число достаточно жестких требований. Так, эти стекла должны обладать высокой химической стойкостью и низкой кристаллизационной способностью, иметь высокую пропускающую способность в достаточно широком спектральном диапазоне и быть технологичными. Обеспечение этих и других функционально важных свойств возможно только при усложнении состава стекла. В связи со сказанным целесообразно познакомиться более детально с понятием *оптическое стекло*, с классификацией оптических стекол, с их спектральными, оптическими и радиационно-оптическими свойствами. Все эти вопросы освещаются в данной главе.

5.1. Классификация оптических стекол

Оптическими называются *бесцветные* многокомпонентные неорганические стекла, основную и подавляющую часть которых составляют стекла силикатной системы. В их состав входит 5 – 8, а иногда и 10 – 12 компонентов (как правило, оксидов). Оптические стекла служат материальной основой любого оптического прибора, поскольку из них изготавливаются линзы, призмы, светоделительные пластинки и другие элементы наблюдательных и измерительных приборов, фотографических и проекционных аппаратов. Как отмечал академик Д. С. Рождественский, «...без оптического стекла нет ни познания природы, ни власти над ней». Необходимым условием создания высококачественных оптических приборов является широкая номенклатура оптических стекол. В отечественном каталоге насчитывается около 110 марок оптического стекла, примерно столько же марок насчитывал каталог фирмы Шотт в г. Йена, другой немецкий каталог – фирмы Шотта в г. Майнце – раза в 2 больше. Особенностью зарубежных каталогов является наличие в них большого числа (в каталоге Майнца – до 40 %) стекол-дублеров. Таковыми называются стекла, отличающиеся от других по показателю преломления на 0.01 и по коэффициенту дисперсии менее чем на 2 единицы. Некоторая неопределенность в указании числа марок стекол в названных каталогах объясняется тем, что какие-то марки стекол постепенно выходят из употребления и поэтому исключаются из действующих каталогов, а какие-то новые марки стекол в них вводятся.

В нормативно-технических документах оптические стекла принято совокупно представлять на диаграмме «показатель преломления n_e – коэффициент дисперсии v_e », носящей имя знаменитого немецкого физика

Э. Аббе. Названный показатель преломления измеряется на длине волны в 546.07 нм (зеленая линия ртутного спектра), а коэффициент дисперсии рассчитывается по формуле

$$v_e = (n_e - 1) / (n_{F'} - n_{C'}), \quad (5.1)$$

где $n_{F'}$ и $n_{C'}$ – значения показателя преломления при длинах волн, равных 479.99 и 643.85 нм (F' и C' – линии кадмиевого спектра, соответственно).

В зависимости от расположения стекла в той или иной области поля диаграммы Аббе устанавливаются *типы* стекол, а в пределах каждого типа стекла отличаются *марками* в зависимости от значений v_e и n_e . В СССР сформировалось следующее деление оптических стекол по типам (оно сохраняется и в современной России): легкие кроны (ЛК), фосфатные кроны (ФК), тяжелые фосфатные кроны (ТФК), кроны (К), баритовые кроны (БК), тяжелые кроны (ТК), сверхтяжелые кроны (СТК), особые кроны (ОК), кронфлинты (КФ), баритовые флинты (БФ), тяжелые баритовые флинты (ТБФ), легкие флинты (ЛФ), флинты (Ф), тяжелые флинты (ТФ), сверхтяжелые флинты (СТФ), особые флинты (ОФ). Стекла типов ОК и ОФ характеризуются особым ходом дисперсионной кривой (зависимости показателя преломления от длины волны) и могут находиться на любом из участков полей, занимаемых на диаграмме Аббе кронами и флинтами, соответственно. Марки стекол того или иного типа обозначаются добавлением номера к указанию типа стекла. Существуют, например, стекла марок ЛК5, К8, ТК20 и т. д.

К стеклам кроновой группы относятся силикатные стекла ЛК, К, БК, и ТК; силикоборатные стекла СТК; фосфатные стекла ФК и ТФК; фторфосфатные стекла ОК. К легким кронам относятся стекла, показатель преломления которых меньше 1.500, а коэффициент дисперсии превышает 67. У кронов показатель преломления находится в пределах от 1.50 до 1.54, а коэффициент дисперсии – от 76 до 55. Баритовые кроны – это стекла с показателем преломления в диапазоне от 1.51 до 1.575 и с коэффициентом дисперсии от 66.5 до 55.5. Стекла с показателем преломления от 1.555 до 1.665 и коэффициентом дисперсии от 64 до 50.5 – тяжелые кроны. Наконец, стекла типа СТК характеризуются значениями показателя преломления выше 1.65 и коэффициента дисперсии до 45. Стекла ФК и ТФК располагаются на диаграмме Аббе над легкими кронами, т. е. они обладают более высоким показателем преломления (до 1.62), чем стекла ЛК, при примерно тех же значениях коэффициента дисперсии. Стекла ОК могут располагаться на диаграмме Аббе в полях кронов всех типов.

Группа флинтов включает в себя собственно флинты, т. е. стекла ЛФ с показателем преломления от 1.545 до 1.600 и коэффициентом дисперсии от 50 до 39, стекла Ф (с названными выше оптическими характеристиками: 1.600 – 1.640; 39 – 35), стекла ТФ (1.640 – 1.900; 35 – 22) и СТФ (выше 1.900; ниже 22). В группу флинтов включены также кронфлинты КФ (1.50 – 1.545; 63 – 50), баритовые флинты БФ 1.52 – 1.70; 56 – 31), тяжелые

баритовые флинт ТБФ (занимают промежуточное положение на диаграмме Аббе между ТФ и СТК), особые флинты ОФ (располагаются на полях КФ и БФ).

Количественное распределение стекол по типам сильно неравномерно. Так, в отечественном каталоге оптических стекол насчитывается 16 марок баритовых флинтов; 12 марок тяжелых кронов; 11 марок тяжелых флинтов; 10 марок сверхтяжелых кронов; 9 марок кронов; по 7 марок легких кронов, тяжелых баритовых флинтов, легких флинтов и флинтов; по 5 марок баритовых кронов и особых флинтов; по 3 марки фосфатных кронов, кронфлинтов и сверхтяжелых флинтов; 2 марки особых кронов и 1 марка тяжелого фосфатного крона. Понятно, что в учебном пособии не представляется возможным полностью охарактеризовать все это множество стекол, тем не менее хотелось бы, чтобы у читателей было некоторое представление об их спектрах пропускания и радиационно-оптической устойчивости. В следующем разделе эта информация будет приведена для стекол 13 типов: ЛК6, ФК14, К8, БК6, ТК20, СТК19, КФ6, БФ21, ТБФ4, ЛФ5, Ф4, ТФ3 и ОФ3. Выбор стекла той или иной марки в качестве представителя того или иного типа стекла осуществлялся с учетом двух факторов. Во-первых, это должны были быть стекла, наиболее часто используемые в производстве оптических приборов. Во-вторых, их характеристики должны были быть, по возможности, средними в ряду стекол выбранного типа.

Одно из основных свойств оптических стекол – их бесцветность – подтверждается данными таблицы 5.1, в которой для названных стекол 13 типов приведены значения длин волн $\lambda_{0,5}$ и $\lambda_{0,9}$, при которых пропускающая способность слоя стекла толщиной в 10 мм составляет соответственно 50 и 90 % от своего максимального значения, достигаемого в видимой области спектра. Как следует из этой таблицы, только у 2 стекол – ТБФ4 и ТФ3 – граница $\lambda_{0,9}$ находится в видимой области. Поскольку максимального светопропускания эти стекла достигают при еще больших длинах волн, становится понятным, что они имеют слабую желтоватую окраску. У всех остальных стекол, особенно у стекол кроновой группы, обе границы лежат в УФ области спектра, поэтому их бесспорно можно отнести к бесцветным стеклам.

Таблица 5.1. Границы пропускания $\lambda_{0,5}$ и $\lambda_{0,9}$ типовых оптических стекол.

Стекло	ЛК6	ФК14	К8	БК6	ТК20	СТК19	КФ6
$\lambda_{0,5}$, нм	321	343	320	322	347	341	317
$\lambda_{0,9}$, нм	350	370	346	346	379	379	339
Стекло	БФ21	ТБФ4	ЛФ5	Ф4	ТФ3	ОФ3	-
$\lambda_{0,5}$, нм	348	382	335	350	372	340	-
$\lambda_{0,9}$, нм	375	432	358	381	408	376	-

5.2. Окрашивающее действие γ -излучения на оптические стекла

При выборе стекол для оптического прибора специального назначения его разработчик ориентируется прежде всего по значениям оптических постоянных стекол, а также по спектрам их пропускания до и после облучения, представленным в нормативно-технической литературе. Чаще всего при этом ему приходится пользоваться информацией об окрашивающем действии γ -излучения, полученной при разных экспозиционных дозах облучения, поскольку получить ее гораздо проще и дешевле, чем таковую для случая облучения стекол корпускулярным излучением. Рассмотрим данные о спектрах пропускания типовых стекол и их спектрах поглощения, наведенного γ -облучением.

Спектры пропускания. Спектры пропускания выбранных стекол 13 типов до и после γ -облучения представлены на рис. 5.1 – 5.13. Облучение стекол производилось на установке с источником Co^{60} при мощности дозы от $3 \cdot 10^3$ до $1 \cdot 10^4$ Р/час при температуре $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$. Толщина образцов составляла 10 мм. Кроме спектров пропускания, измерялись значения интегральной оптической плотности образцов в видимой области спектра (d_0) и ее приращения (Δd_4 и Δd_5), вызванного γ -облучением с экспозиционными дозами в $1 \cdot 10^4$ и $1 \cdot 10^5$ Р. Все эти измерения проводились через 2 часа после окончания облучения, в промежутке между окончанием облучения и началом спектроскопических измерений образцы облученных стекол хранились в темноте при комнатной температуре.

Как следует из представленных рисунков, после γ -облучения у всех стекол в той или иной степени понижается пропускающая способность, особенно сильно эта тенденция выражена в УФ и в фиолетово-синей областях спектра. Можно даже считать, что с ростом дозы облучения наблюдается смещение границы пропускания стекла в длинноволновую сторону, хотя, конечно, следует помнить, что и по форме, и по природе коротковолновые, нарастающие с длиной волны части спектров пропускания необлученного и облученного стекла принципиально отличаются друг от друга.

Характер радиационно-стимулированного изменения спектров пропускания стекла сильно зависит от типа стеклообразующей системы. Чтобы убедиться в этом, достаточно сопоставить, например, спектры пропускания силикатного и фосфатного кронов ЛК6 и ФК14 (рис. 5.1 и 5.2, соответственно), отвечающие одинаковым дозам облучения. Так, если у облученного стекла ЛК6 пропускающая способность растет с длиной волны от 300 нм практически монотонно, то у стекла ФК14 с ростом длины волны от 300 нм она также сначала возрастает, однако после 380 нм падает, достигая минимума примерно при 520 нм, и только после этого снова постепенно увеличивается, выходя на максимальное значение при длинах волн, превышающих 800 нм. В результате при дозе в $1 \cdot 10^5$ Р

граница полупропускания у силикатного стекла ЛК6 оказывается примерно при 425 нм, а у фосфатного стекла – при 625 нм. Следствием этого является то, что после облучения фосфатный крон приобретает красную окраску в отличие от силикатного легкого крона, который демонстрирует окраску желтого цвета. Иными словами, в ходе облучения пропускающая способность в видимой области спектра у стекла ЛК6 уменьшается в значительно меньшей степени, чем у стекла ФК14, а это в свою очередь означает, что радиационно-оптическая устойчивость в видимой области спектра у силикатного крона ЛК6 заметно выше, чем у фосфатного крона ФК14.

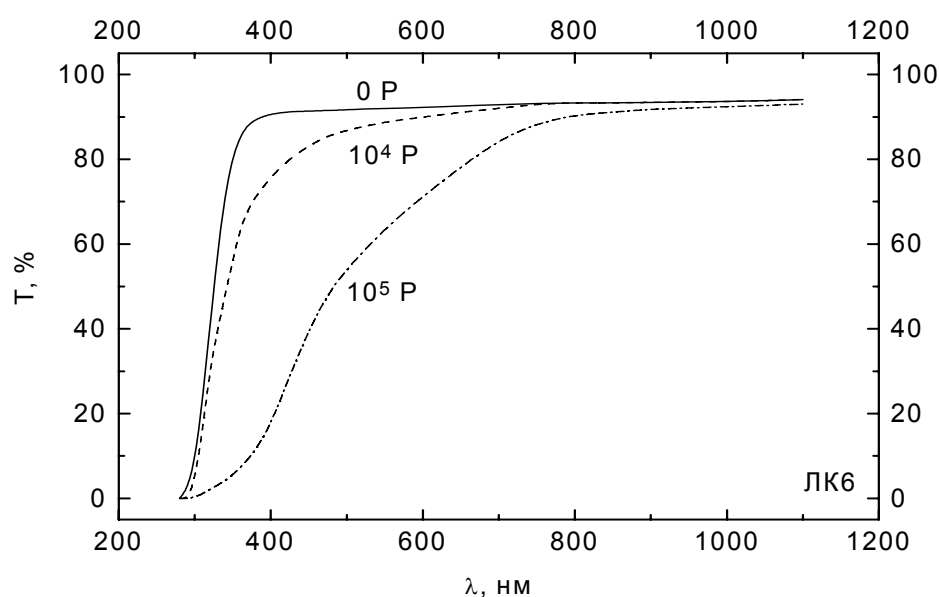


Рис. 5.1. Спектры пропускания стекла ЛК6 до и после γ -облучения разными дозами.

Стекла остальных 11 марок относятся к стеклам силикатной системы. Спектры пропускания одних стекол после облучения демонстрируют определенную структурированность, спектры других представляют собой практически монотонно нарастающие с длиной волны функции, как правило, достигающие своего максимума только в ближней ИК области спектра. Так, например, в спектрах пропускания стекол К8 (рис. 5.3) и БК6 (рис. 5.4), особенно после облучения дозой в 10^5 Р, угадываются особенности при 300, 440 и 620 - 670 нм, тогда как у стекла ТК20 (рис. 5.5) эти особенности располагаются при 300 и 620 нм, а у стекла СТК19 (рис. 5.6) эти спектры практически бесструктурные.

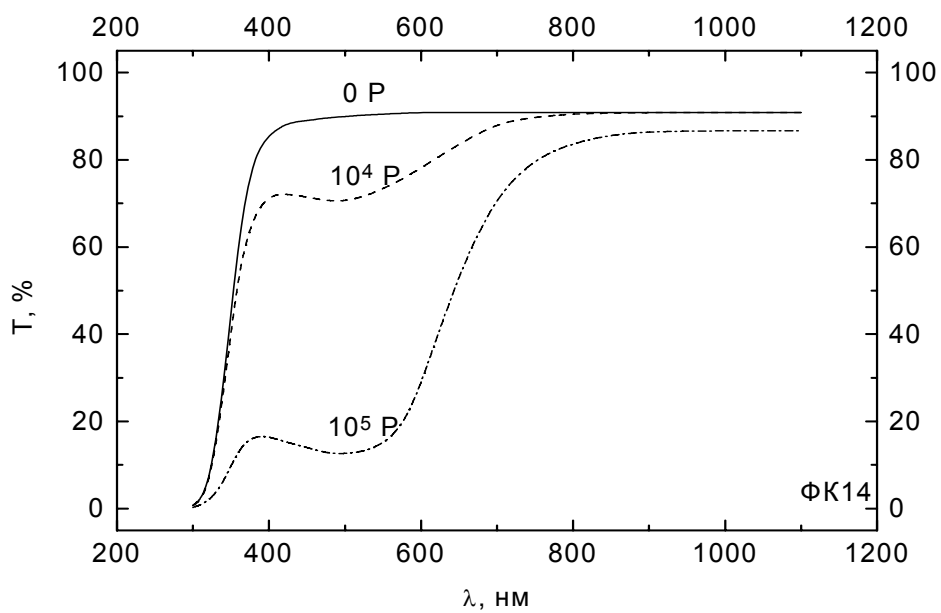


Рис. 5.2. Спектры пропускания стекла ФК14 до и после γ -облучения разными дозами.

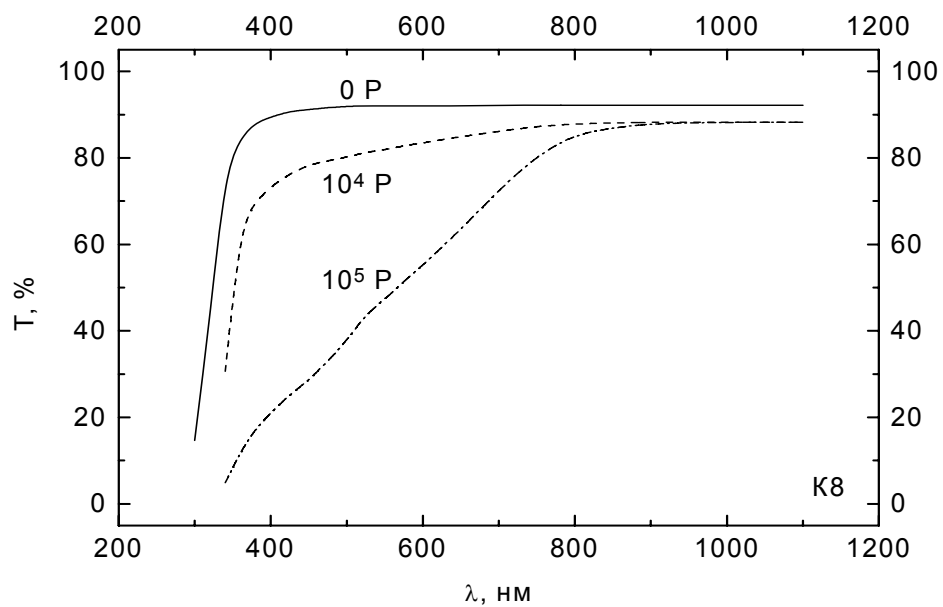


Рис. 5.3. Спектры пропускания стекла К8 до и после γ -облучения разными дозами.

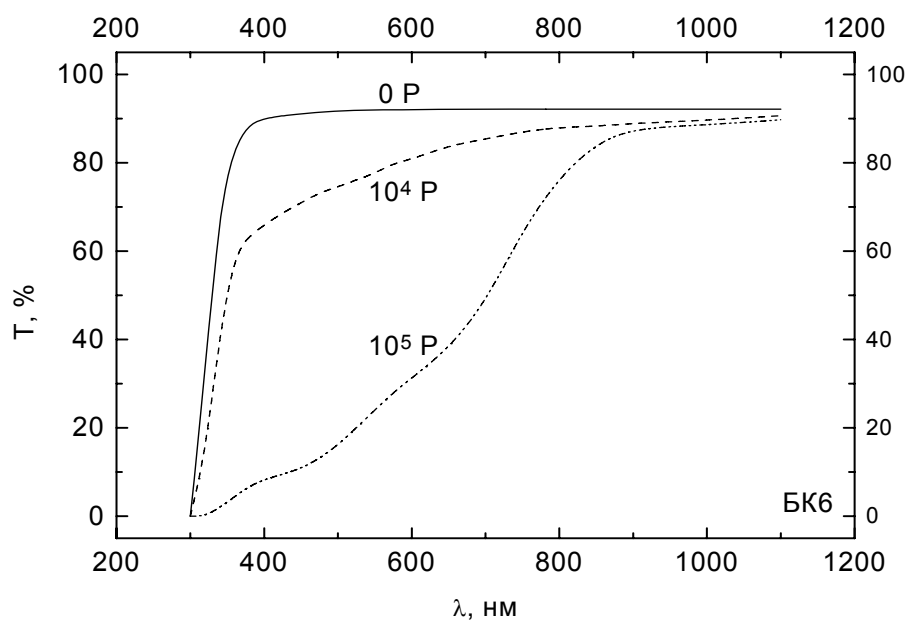


Рис. 5.4. Спектры пропускания стекла BK6 до и после γ -облучения разными дозами.

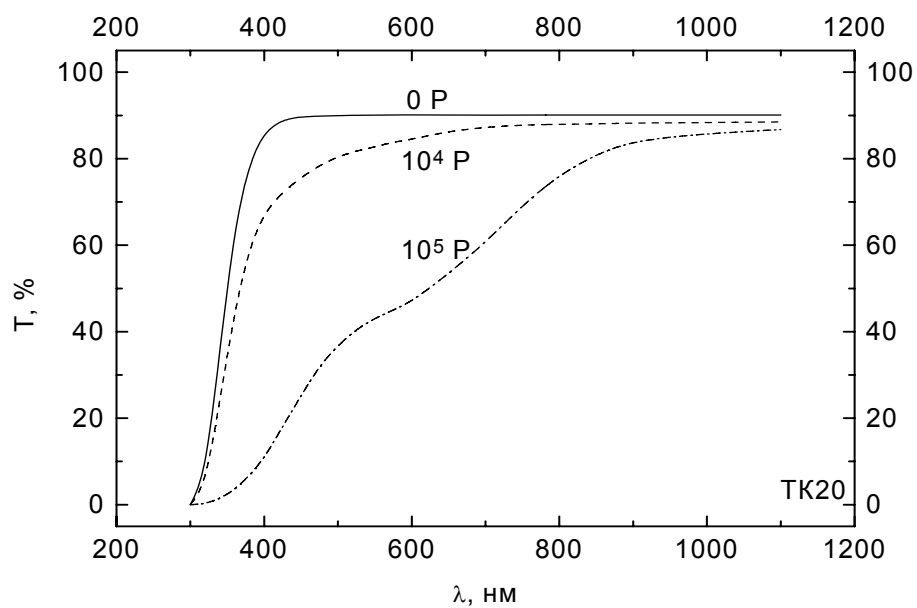


Рис. 5.5. Спектры пропускания стекла TK20 до и после γ -облучения разными дозами.

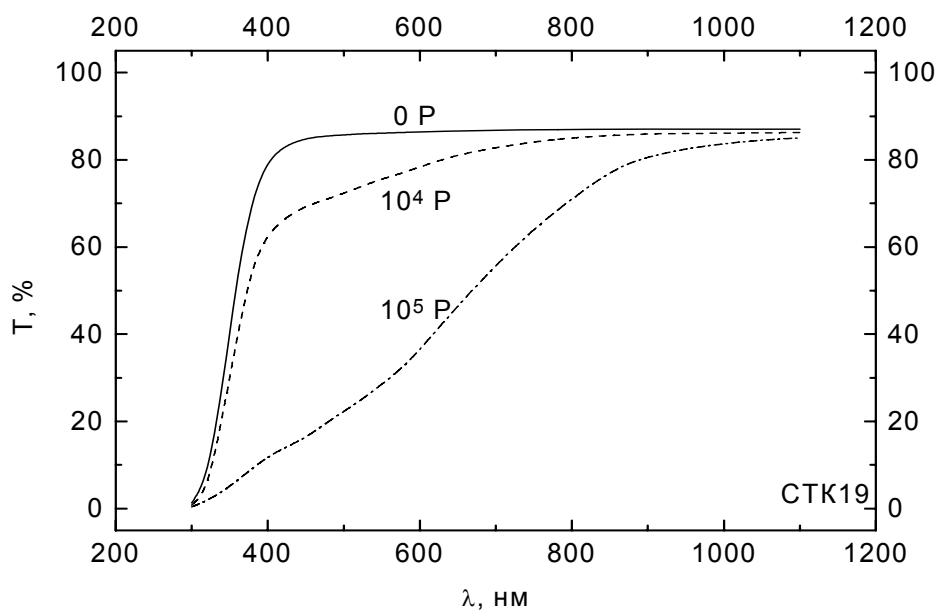


Рис. 5.6. Спектры пропускания стекла СТК19 до и после γ -облучения разными дозами.

Спектры пропускания стекла КФ6 (рис. 5.7) почти не имеют структуры при дозе в 10^4 Р, тогда как при дозе в 10^5 Р в них выявляются особенности приблизительно при 400 и 720 нм.

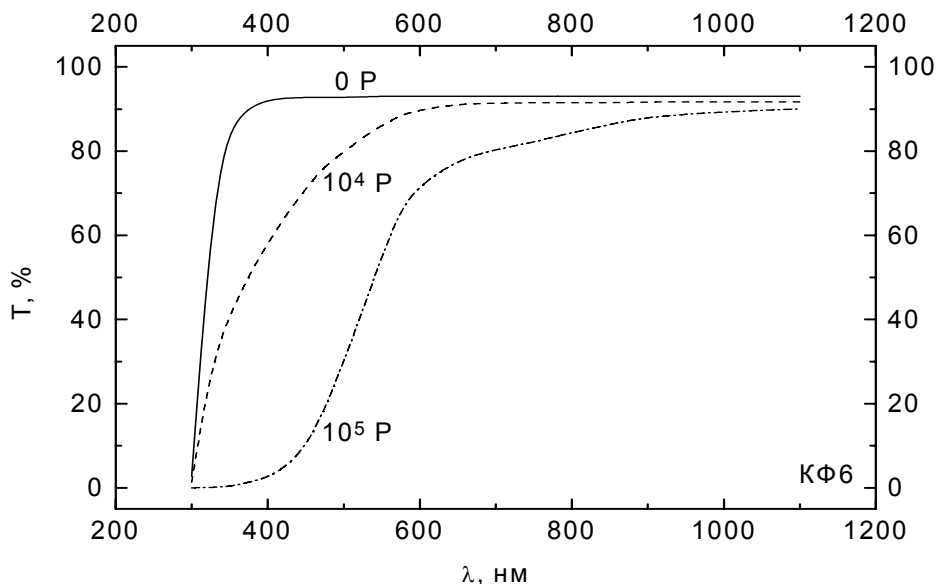


Рис. 5.7. Спектры пропускания стекла КФ6 до и после γ -облучения разными дозами.

Спектры пропускания облученных стекол БФ21 (рис. 5.8), ЛФ5 (рис. 5.10) и Ф4 (рис. 5.11) позволяют говорить о наличии полос поглощения центров окраски с максимумами примерно при 440 и 750 нм, чего нельзя сказать об аналогичных спектрах стекла ТБФ4 (рис. 5.9), поскольку они демонстрируют практически монотонный рост пропускающей способности при увеличении длины волны.

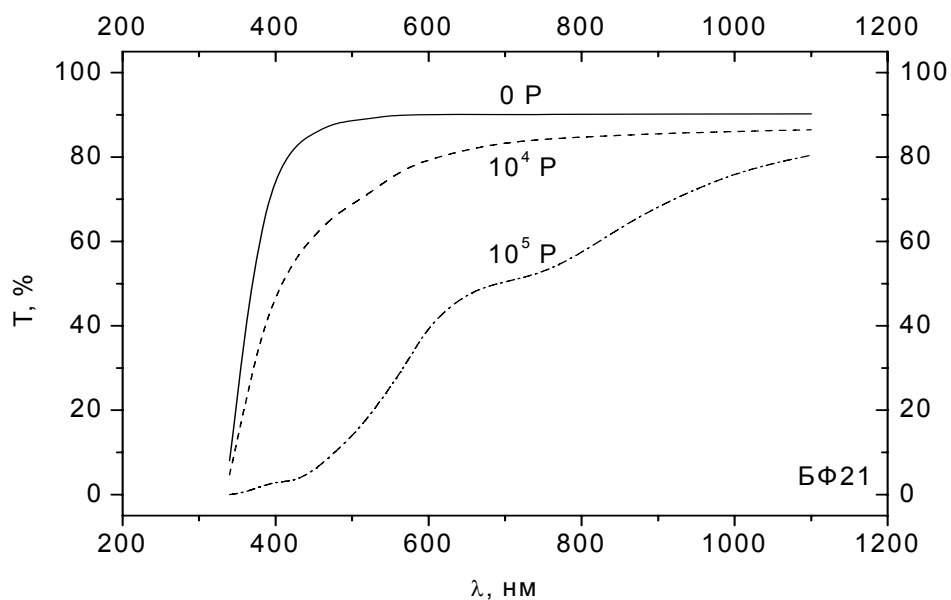


Рис. 5.8. Спектры пропускания стекла БФ21 до и после γ -облучения разными дозами.

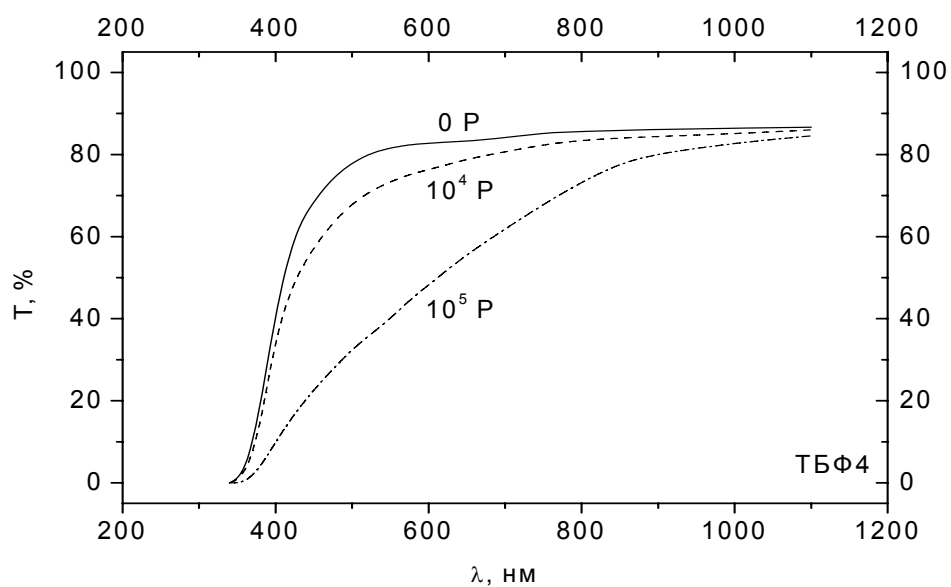


Рис. 5.9. Спектры пропускания стекла ТБФ4 до и после γ -облучения разными дозами.

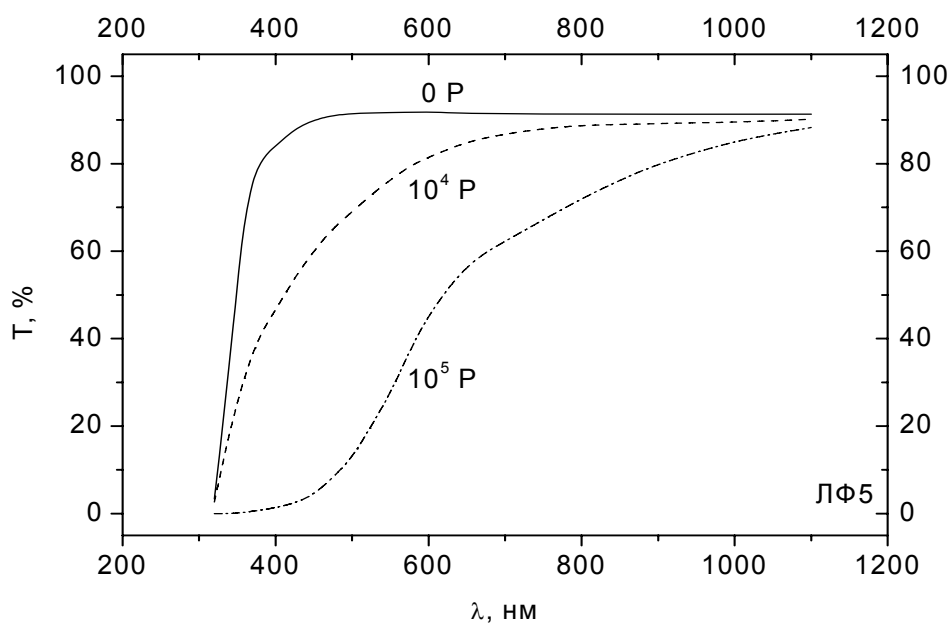


Рис. 5.10. Спектры пропускания стекла ЛФ5 до и после γ -облучения разными дозами.

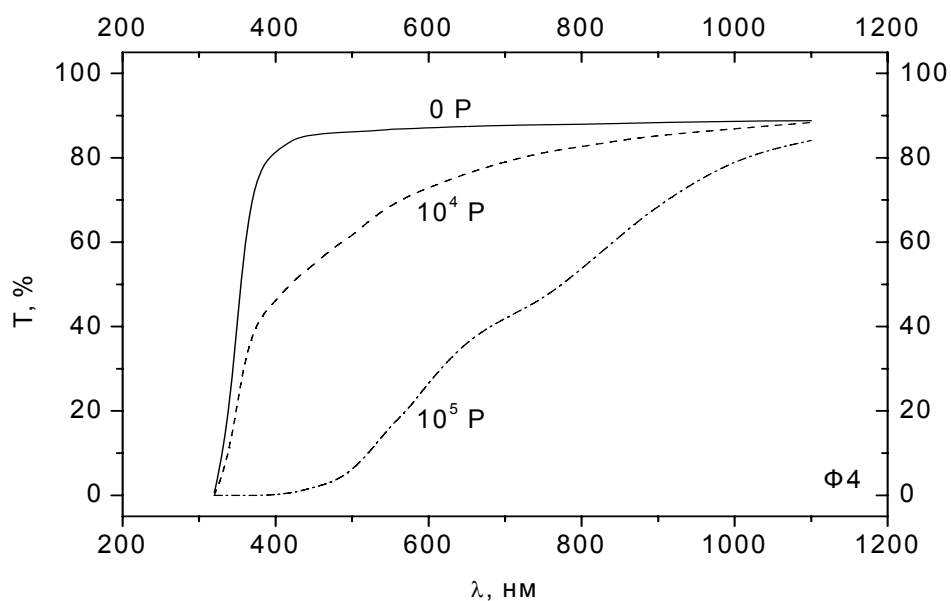


Рис. 5.11. Спектры пропускания стекла Ф4 до и после γ -облучения разными дозами.

Вид спектров пропускания стекол ТФ3 (рис. 5.12) и ОФ3 (рис. 5.13) свидетельствует о том, что в их спектрах наведенного поглощения должны

присутствовать полосы с максимумами при 450 и 800 нм и 460 и 900 нм, соответственно.

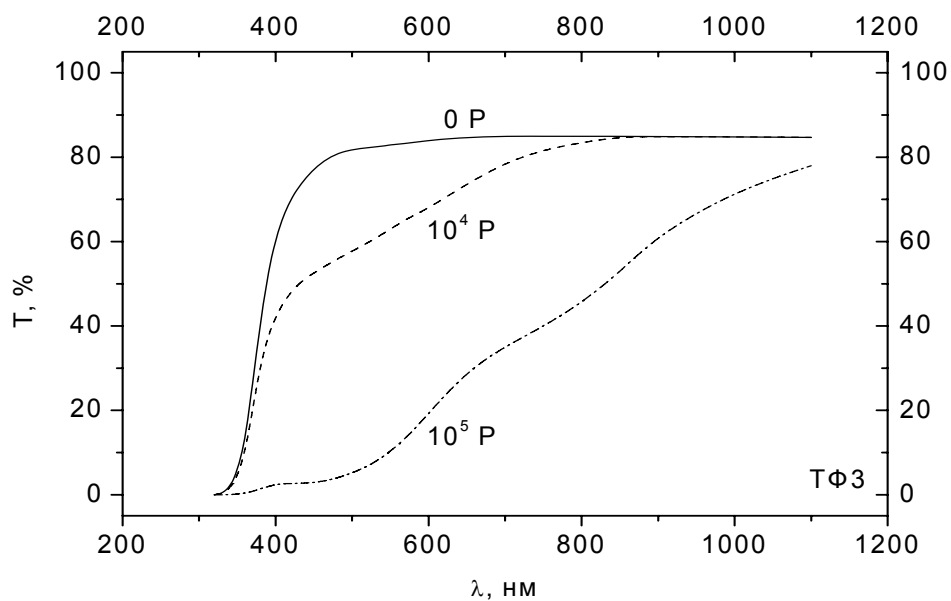


Рис. 5.12. Спектры пропускания стекла ТФ3 до и после γ -облучения.

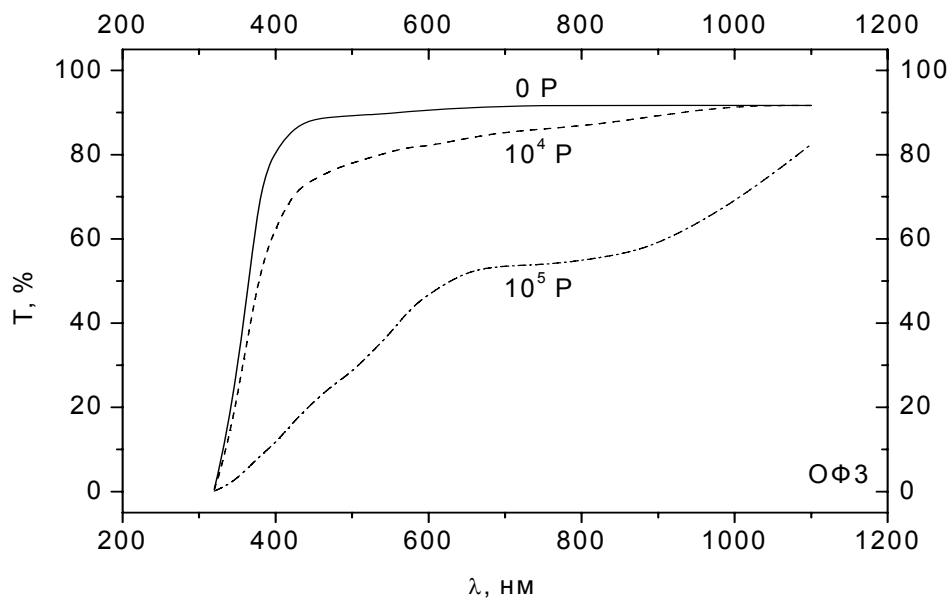


Рис. 5.13. Спектры пропускания стекла ОФ3 до и после γ -облучения.

В целом же на основе изучения спектров пропускания типовых оптических стекол, измеренных до и после облучения и представленных на

рис. 5.1 - 5.13, можно сделать вывод о том, что эти стекла можно условно считать устойчивыми к γ -излучению только при экспозиционных дозах, не превышающих 10^4 Р. При дозе в 10^5 Р названные стекла утрачивают пропускающую способность в видимой области спектра более чем на половину, что убедительно говорит о невозможности их использования для построения оптических приборов специального назначения, которые должны или могут функционировать в радиационных полях с экспозиционными дозами, превышающими 10^4 Р.

Спектры оптической плотности. Говоря о радиационно-стимулированном окрашивании оптических стекол, нельзя забывать о том, что их суммарная пропускающая способность после облучения обусловлена потерями света за счет трех таких факторов, как Френелевское отражение света от двух поверхностей раздела «стекло – воздух», поглощение света слоем стекла и поглощение света радиационными центрами окраски. У каждого стекла свое количественное соотношение действия названных факторов. Первые два фактора в сумме определяют начальную интегральную плотность d_0 . Как показывает таблица 5.2, значения d_0 , как и оптической плотности Френелевских потерь, $d_e(\Phi p.)$, при переходе от стекла к стеклу могут варьироваться в достаточно широких пределах. Что же касается интегральной оптической плотности наведенного радиацией поглощения, Δd_4 и Δd_5 , то в ряду рассматриваемых стекол она либо сопоставима со значениями d_0 и $d_e(\Phi p.)$, либо существенно превосходит их, особенно при дозе облучения в 10^5 Р.

Оценим оптическую плотность Френелевских потерь в зеленой области спектра с учетом отражения света на двух границах раздела «стекло – воздух» при нормальном падении света на них, используя уравнение

$$d_e(\Phi p.) = \lg[1/(1 - R_e)^2], \quad (5.2)$$

где R_e - коэффициент Френелевского отражения, рассчитываемый по формуле:

$$R_e = (n_e - 1)^2 / (n_e + 1)^2. \quad (5.3)$$

Из таблицы 5.2 следует, во-первых, что интегральная оптическая плотность образцов стекол до облучения, d_0 , в основном определяется Френелевскими потерями света при отражении от двух поверхностей раздела сред, $d_e(\Phi p.)$. Во-вторых, стекла только 5 марок (ЛК6, К8, БК6, ТК20 и КФ6) утрачивают пропускающую способность менее чем на 10% при облучении дозой в 10^4 Р. У всех остальных стекол при этой дозе снижение пропускающей способности заметно превосходит 10%, не говоря уже о дозе в 10^5 Р, при которой степень снижения пропускающей способности стекол - в зависимости от их марки - лежит в пределах от 18.7 до 80.0 %. Наименее устойчивыми к действию γ -излучения являются стекла Ф4, ТФ3, ТФК1, ФК14, ЛФ5, а наиболее устойчивыми – стекла ЛК6, КФ6.

Таблица 5.2. Интегральная оптическая плотность до облучения, d_0 , оптическая плотность Френелевских потерь в зеленой области спектра, $d_e(\Phi p.)$, радиационно-стимулированное приращение оптической плотности, Δd_4 и Δd_5 , и интегральная пропускающая способность типовых оптических стекол, T_4 и T_5 , после γ -облучения дозами 10^4 и 10^5 Р.

Стекло	ЛК6	ФК14	ТФК1	К8	БК6	ТК20	СТК19
d_0	0.034	0.047	0.051	0.039	0.042	0.051	0.067
n_e	1.4721	1.5821	1.6107	1.5183	1.5421	1.6247	1.7476
$d_e(\Phi p.)$	0.032	0.045	0.048	0.038	0.040	0.051	0.067
Δd_4	0.015	0.070	0.060	0.035	0.045	0.040	0.080
$T_4, \%$	96.6	85.1	87.1	92.3	90.2	91.2	83.2
Δd_5	0.09	0.50	0.52	0.21	0.40	0.26	0.34
$T_5, \%$	81.3	31.6	30.2	61.7	39.8	55.0	45.7
Стекло	КФ6	БФ21	ТБФ4	ЛФ5	Ф4	ТФ3	ОФ3
d_0	0.037	0.051	0.075	0.046	0.052	0.064	0.050
n_e	1.5027	1.6178	1.7836	1.5783	1.6285	1.7232	1.6157
$d_e(\Phi p.)$	0.036	0.050	0.072	0.045	0.051	0.064	0.050
Δd_4	0.030	0.090	0.050	0.070	0.130	0.130	0.050
$T_4, \%$	93.3	81.3	89.1	85.1	74.1	74.1	89.1
Δd_5	0.18	0.38	0.39	0.50	0.70	0.70	0.32
$T_5, \%$	66.1	41.7	40.7	31.6	20.0	20.0	47.9

Важную роль в определении радиационно-оптической устойчивости облученных стекол играет, с одной стороны, их чувствительность к излучению, а с другой стороны, - степень перекрытия спектров наведенного радиацией поглощения с кривой видности человеческого глаза. При одних и тех же дозах облучения интенсивность наведенного поглощения у стекол разных типов может быть разной. Чтобы убедиться в этом, рассмотрим представленные на рисунках от 5.14 - 5.26 спектры наведенного поглощения тех стекол, которые были обсуждены в первой части настоящего раздела. При этом имеет смысл сравнить стекла по виду и интенсивности спектров наведенного поглощения, а также по значениям $\Delta d(E)$, например, в области максимума чувствительности человеческого глаза ($E = 2.25$ эВ) и на границах видимой области спектра (1.77 и 3.1 эВ), поскольку именно эти факторы будут характеризовать чувствительность стекла к γ -излучению.

Спектры наведенного поглощения силикатных стекол кроновой группы (ЛК6, К8 и ТК20) на высокоэнергетической границе видимой области ($E = 3.1$ эВ) незначительно (от 0.6 до 0.72) отличаются друг от

друга по интенсивности (рис. 5.14 – 5.16), однако в области 2.25 эВ и на низкоэнергетической границе видимой области ($E = 1.77$ эВ) величина наведенного поглощения заметно нарастает при переходе от стекла ЛК6 к К8 и ТК20. Так, значения оптической плотности при 2.25 эВ в этой группе стекол равны 0.16, 0.29 и 0.32, а при 1.77 эВ – 0.041, 0.104 и 0.172, соответственно. Эти данные однозначно свидетельствуют, что при одной и той же дозе облучения стекло ЛК6 характеризуется минимальной, К8 – промежуточной, а ТК20 – максимальной чувствительностью к γ -излучению. Соответственно, радиационно-оптическая устойчивость указанных стекол нарастает в обратном порядке: от ТК20 к К8 и, наконец, к ЛК6, что хорошо подтверждается данными табл. 5.2 по значениям Δd_5 .

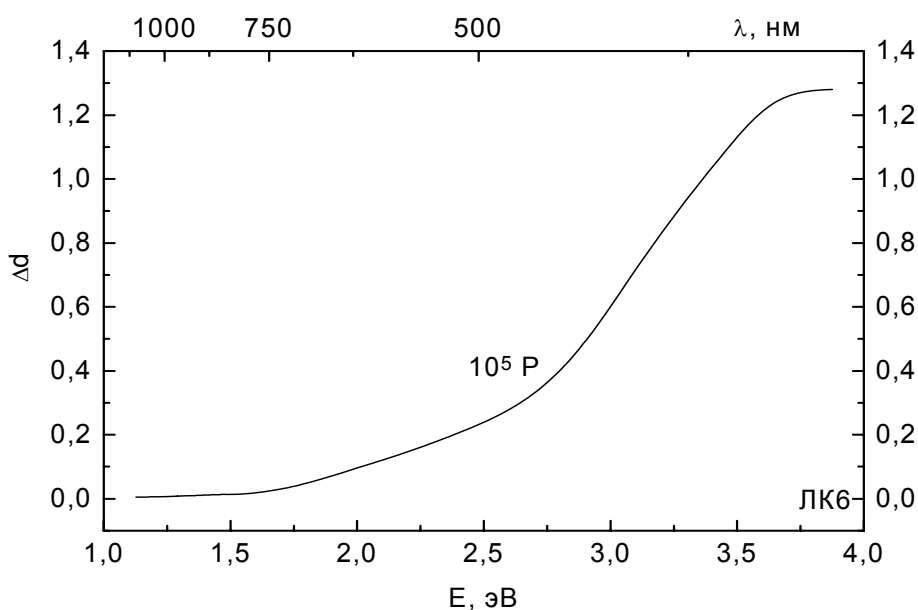


Рис. 5.14. Спектр наведенного поглощения стекла ЛК6 после γ -облучения дозой 10^5 Р.

Отметим, что в спектрах наведенного поглощения стекол К8 и ТК20 отчетливо выявляется полоса с максимумом в области 2.0 эВ, низкоэнергетическое крыло которой незначительно простирается в ближнюю ИК область спектра. В спектре НП стекла ЛК6 угадывается максимум примерно при 2.2 – 2.3 эВ достаточно слабой полосы, которая практически полностью располагается в видимой области спектра. Говоря о чувствительности человеческого глаза в низкоэнергетической части видимой области спектра, следует иметь в виду, что наведенное поглощение в ней может быть обусловлено и ИК-полосами, если их высокоэнергетические крылья попадают в видимую область. Далее, в спектре НП стекла К8 наличествует более интенсивная полоса с максимумом при 2.8 эВ, а у стекла ТК20 – слабое плечо с максимумом

около 3.1 эВ на низкоэнергетическом крыле более интенсивной полосы с максимумом в УФ области спектра ($E > 3.5$ эВ). Такая высокоэнергетическая полоса имеется в спектрах всех трех рассматриваемых стекол.

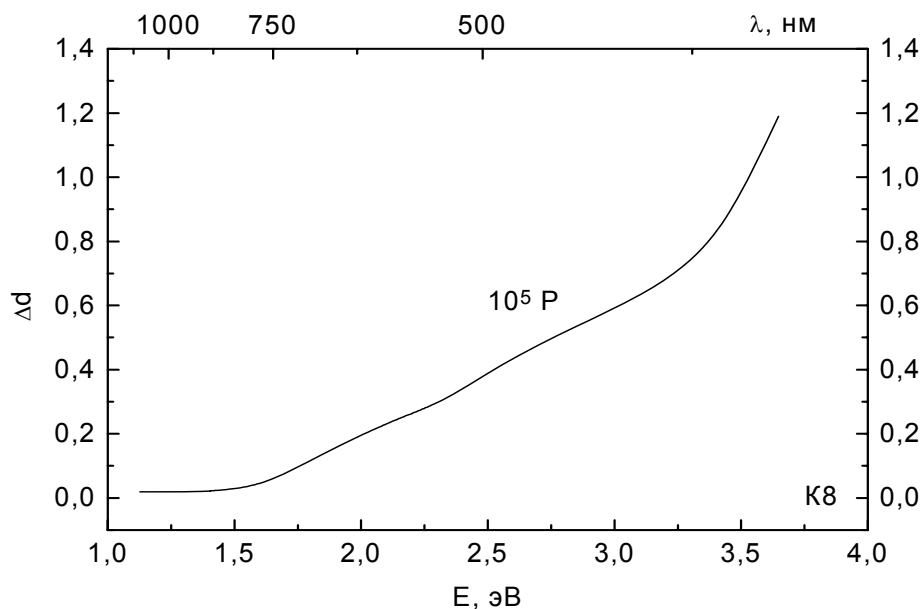


Рис. 5.15. Спектр наведенного поглощения стекла К8 после γ -облучения дозой 10^5 Р.

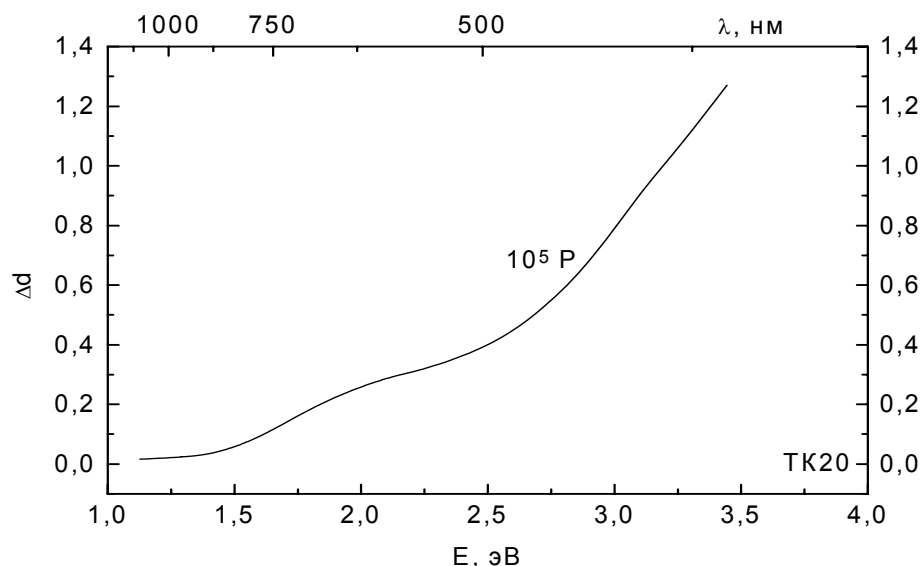


Рис. 5.16. Спектр наведенного поглощения стекла ТК20 после γ -облучения

Из рис. 5.14 – 5.16 легко видеть, что низкоэнергетическое крыло этой полосы вносит большой вклад в оптическую плотность стекла в видимой

области спектра. Это означает, по-видимому, что УФ полосы поглощения центров окраски влияют на радиационно-оптическую устойчивость стекол к γ -излучению, причем в гораздо большей степени, чем ИК полосы, поскольку интенсивность первых гораздо выше таковой последних дозой 10^5 Р.

Как следует из рис. 5.17, спектр наведенного поглощения фосфатного крона ФК14 сильно отличается по своей структуре от аналогичных спектров силикатных кронов. В этом спектре отчетливо выделяется широкая полоса с максимумом при 2.4 эВ, и, кроме того, можно, по-видимому, говорить, по крайней мере, еще об одной или двух полосах, расположенных в более высокоэнергетической области.

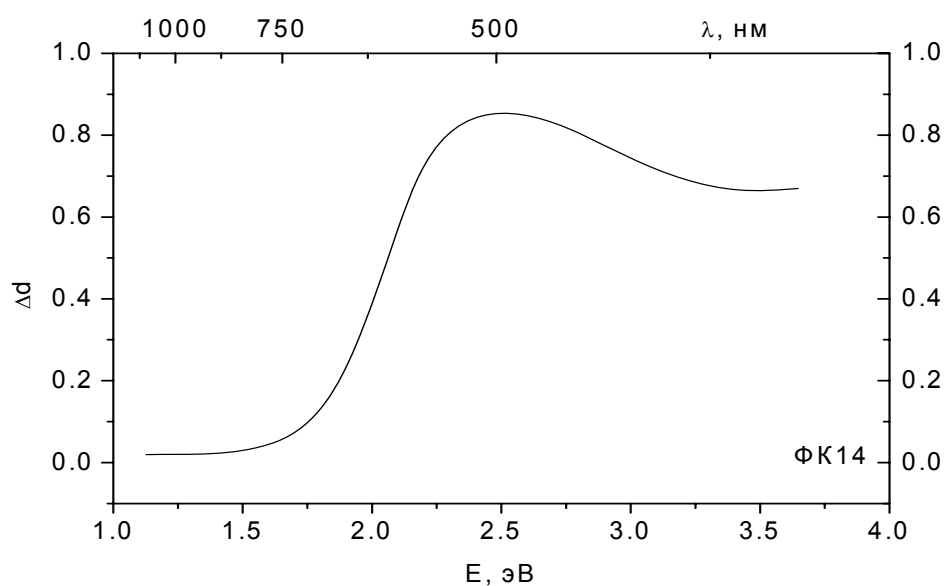


Рис. 5.17. Спектр наведенного поглощения стекла ФК14 после γ -облучения дозой 10^5 Р.

Разумеется, это стекло никак не может быть отнесено к разряду стекол с высокой радиационно-оптической устойчивостью, поскольку при дозе в 10^5 Р оно характеризуется достаточно высокими значениями $\Delta d(E)$ при 1.77, 2.25 и 3.1 эВ: 0.100, 0.785 и 0.714, соответственно. Иными словами, не только полоса с максимумом при 2.4 эВ, но также и очень интенсивные полосы поглощения центров окраски в УФ области спектра своими низкоэнергетическими крыльями определяют высокие значения наведенного поглощения названного фосфатного крона в видимой области спектра (см. табл. 5.2). Столь сильное отличие чувствительности стекла ФК14 к γ -излучению от таковой у рассмотренных силикатных стекол кроновой группы обусловлено скорее всего тем, что это стекло фосфатной основы, локализованные состояния которого вблизи границы подвижности

дырок имеют совершенно другую природу, чем таковые у силикатных стекол кроновой группы.

Как следует из рис. 5.18 и 5.19, стекла БК6 и СТК19 характеризуются достаточно интенсивным наведенным поглощением как на границах видимой области, так и в ее середине. У обоих стекол это обусловлено наличием достаточно широких, перекрывающихся друг с другом полос наведенного поглощения с максимумами, расположенными приблизительно при 1.8 – 1.9 и 2.8 эВ у БК6 и при 1.7, 2.2, 2.8 и 3.4 эВ у СТК19. Результатом являются достаточно высокие значения Δd_5 (см. табл. 5.2): 0.40 и 0.34, соответственно.

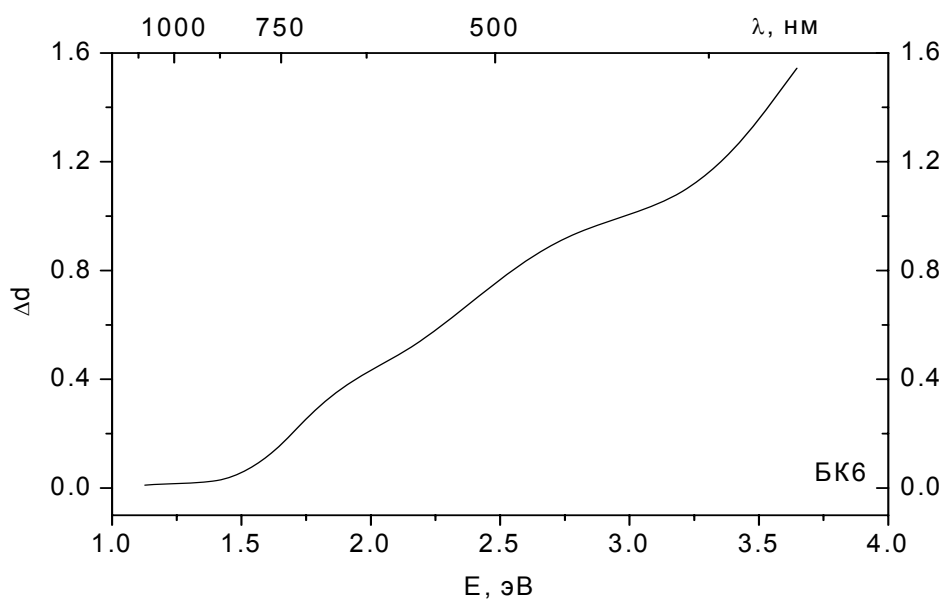


Рис. 5.18. Спектр наведенного поглощения стекла БК6 после γ -облучения дозой 10^5 Р.

В отличие от БК6 и СТК19 стекло КФ6 (рис. 5.20) не имеет интенсивных полос наведенного поглощения в низкоэнергетической части видимой области, относительно слабым является и наведенное поглощение при 2.25 эВ, следствием чего является более низкое, чем у двух названных выше стекол, значение $\Delta d_5 = 0.18$ (табл. 5.2). Как следует из этой таблицы, по этому параметру стекло КФ6 уступает только стеклу ЛК6. Отметим, что указанное соотношение в значениях Δd_5 в ряду стекол БК6, СТК19 и КФ6 наблюдается даже при том условии, что при $E > 2.25$ эВ интенсивность наведенного поглощения стекла КФ6 достаточно быстро нарастает по мере продвижения в высокоэнергетическую сторону, в результате чего при $E = 3.1$ эВ это стекло имеет примерно в полтора раза более высокую интенсивность наведенного поглощения, чем стекла БК6 и СТК19. Таким образом, заметные различия структуры спектров наведенного поглощения в видимой области спектра у стекол БК6 и СТК19, с одной стороны, и у

стекла КФ6, с другой стороны, приводят к отличию примерно в 2 раза их значений Δd_5 , а, следовательно, и их интегральной радиационно-оптической устойчивости к γ -облучению с дозой в 10^5 Р.

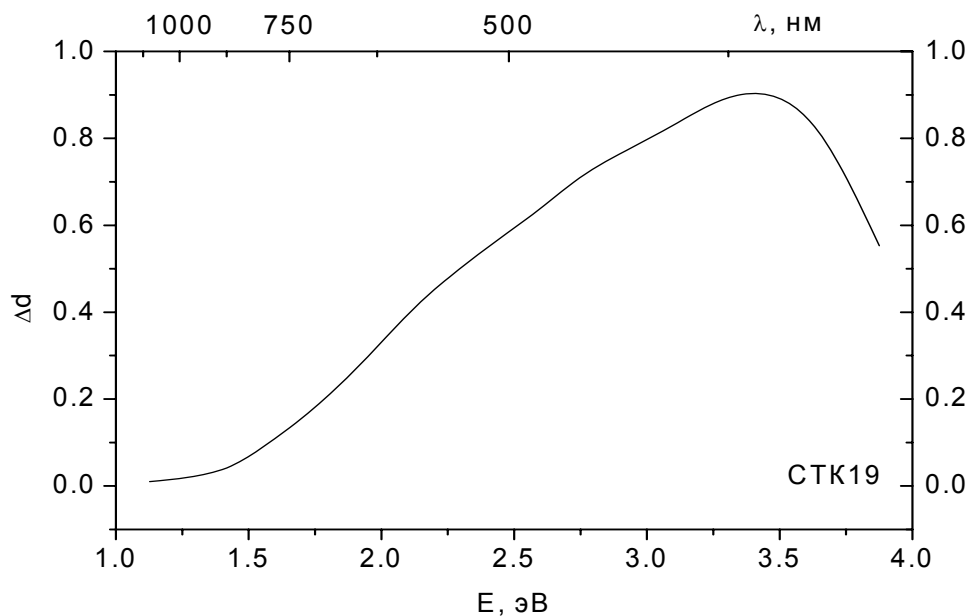


Рис. 5.19. Спектр наведенного поглощения стекла СТК19 после γ -облучения дозой 10^5 Р.

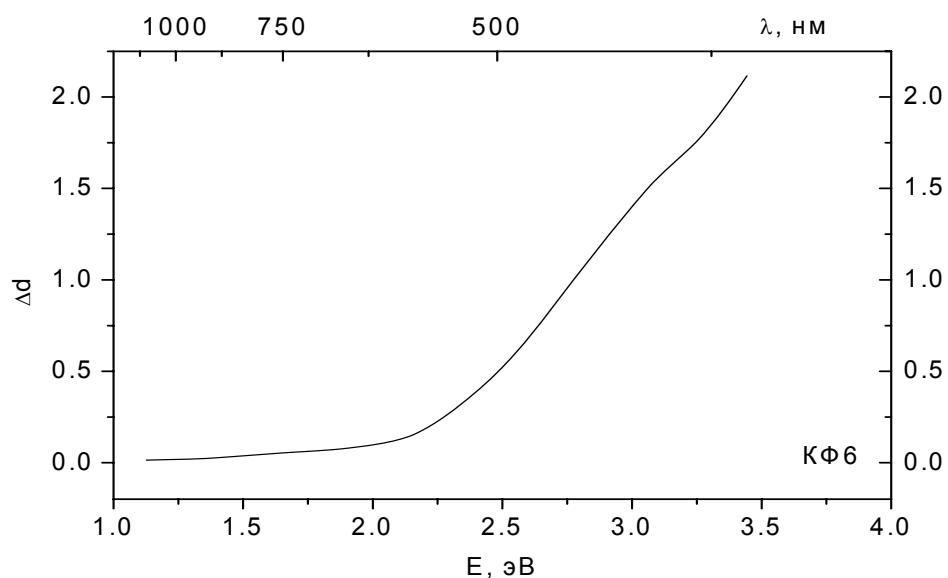


Рис. 5.20. Спектр наведенного поглощения стекла КФ6 после γ -облучения дозой 10^5 Р.

В спектре НП стекла БФ21 (рис. 5.21) наблюдаются максимумы полос поглощения, расположенные примерно при 1.65 и 2.95 эВ. Кроме

того, можно предположить, что имеется полоса с максимумом в районе 2.5 эВ и наиболее интенсивная УФ полоса с максимумом при $E > 3.5$ эВ. Это стекло обладает довольно низкой радиационно-оптической устойчивостью, поскольку спектр НП перекрывает всю видимую область и простирается и в смежные с ней УФ и ИК области спектра. Значения приращения оптической плотности при 1.77, 2.25 и 3.1 эВ равны 0.25, 0.55 и 1.41, соответственно, а интегральная оптическая плотность наведенного поглощения равна 0.38 (табл. 5.2), поэтому названное стекло характеризуется достаточно сильным ослаблением пропускающей способности в видимой области спектра после воздействия γ -излучения с дозой в 10^5 Р.

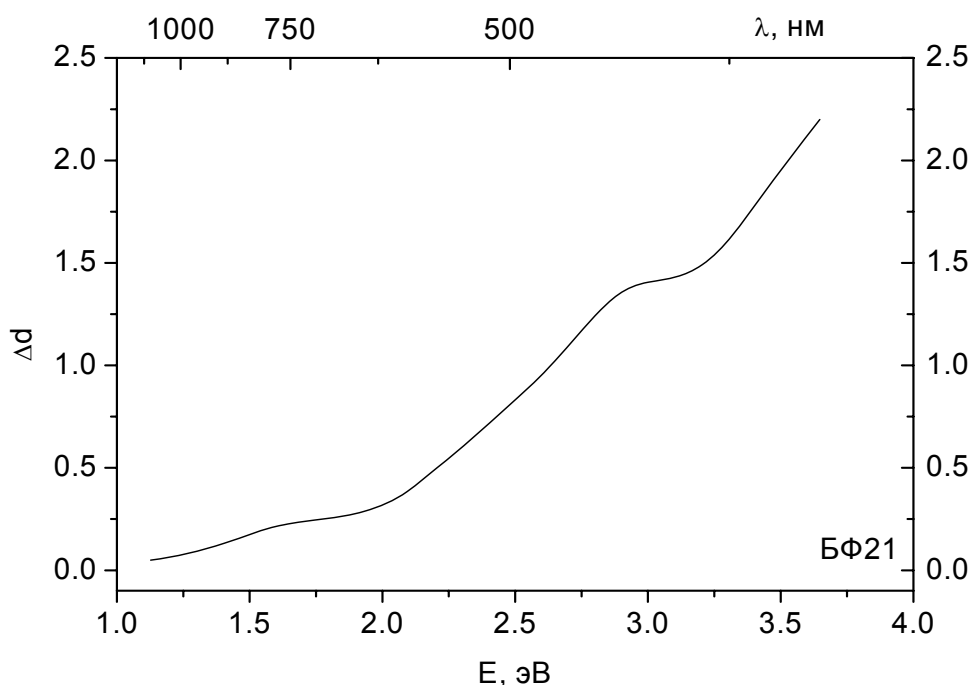


Рис. 5.21. Спектр наведенного поглощения стекла БФ21 после γ -облучения дозой 10^5 Р.

Спектр наведенного поглощения стекла ТБФ4 (рис. 5.22) представляет собой практически монотонно нарастающую зависимость приращения оптической плотности от энергии квантов, на которой угадываются слабые максимумы в области 1.4, 2.35 и 3.0 эВ. В целом при дозе в 10^5 Р данное стекло характеризуется достаточно высоким значением приращения оптической плотности в видимой области спектра, т. е. никак его нельзя отнести к разряду стекол с приемлемой радиационно-оптической устойчивостью.

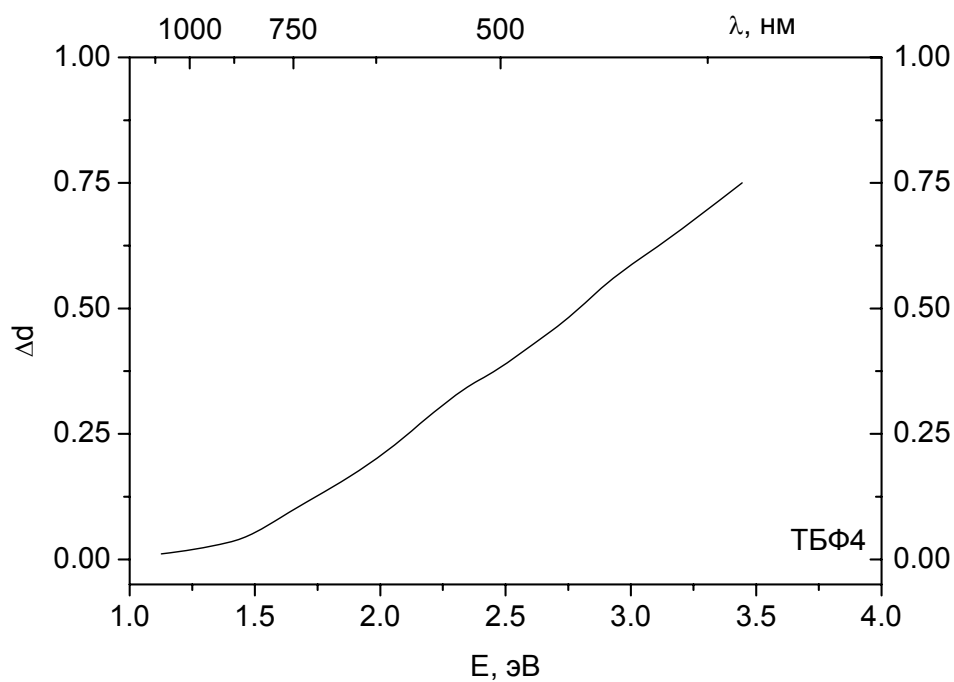


Рис. 5.22. Спектр наведенного поглощения стекла ТБФ4 после γ -облучения дозой 10^5 Р.

Не являются таковыми и флинтовые стекла ЛФ5 (рис. 5.23), Ф4 (рис. 5.24) и особенно ТФ3 (рис. 5.25) и ОФ3 (рис. 5.26).

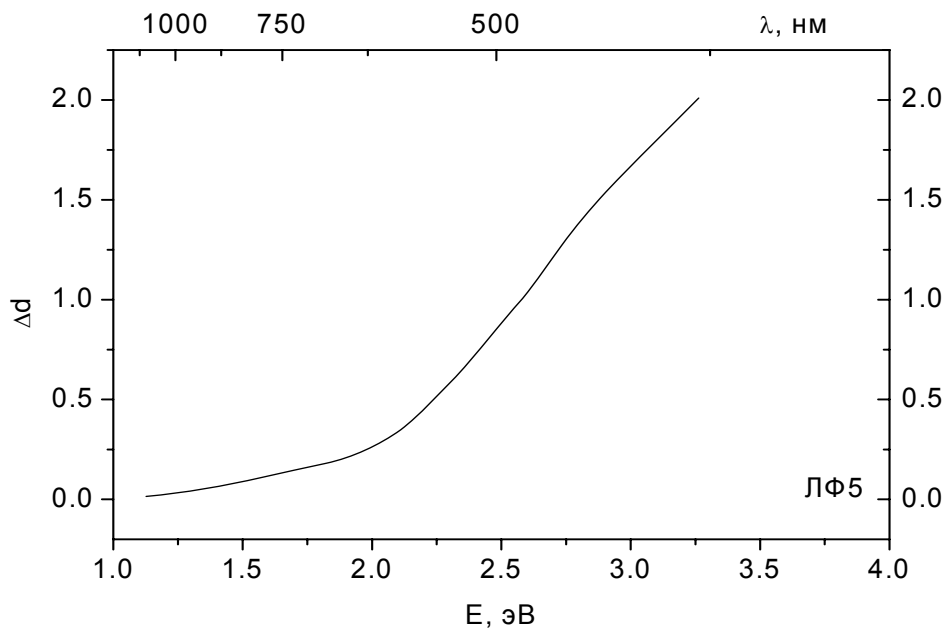


Рис. 5.23. Спектр наведенного поглощения стекла ЛФ5 после γ -облучения дозой 10^5 Р.

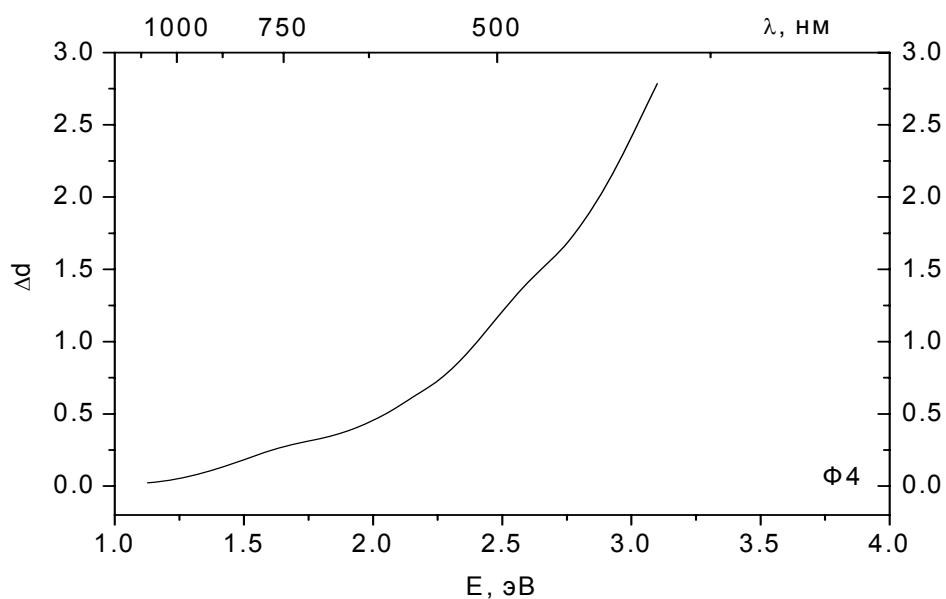


Рис. 5.24. Спектр наведенного поглощения стекла Ф4 после γ -облучения дозой 10^5 Р.

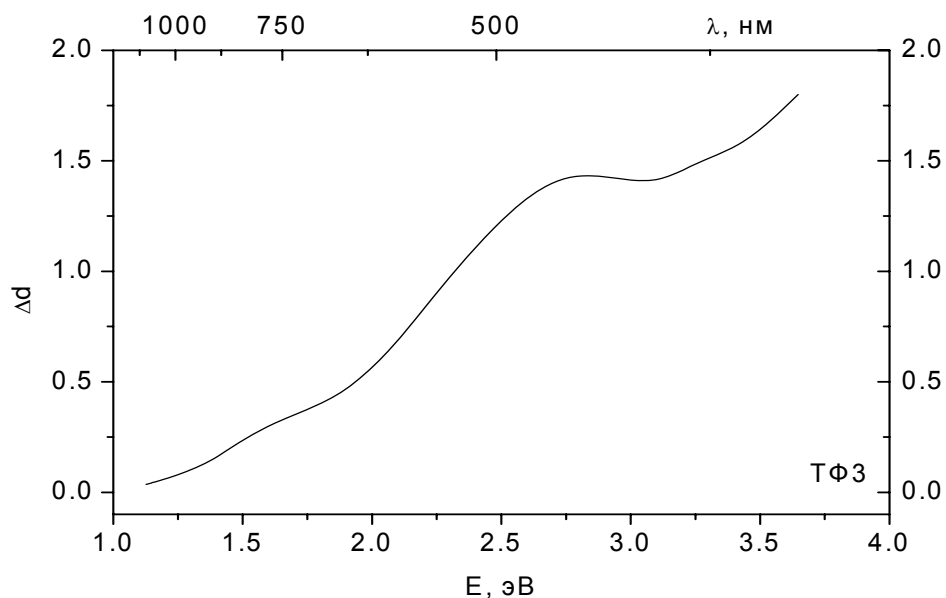


Рис. 5.25. Спектр наведенного поглощения стекла ТФ3 после γ -облучения дозой 10^5 Р.

Из рис. 5.24 и 5.25 видно, что в спектрах наведенного поглощения стекла Ф4 и ТФ3 наблюдаются максимумы при 1.6, 2.2 и 2.6 эВ, в аналогичном спектре стекла ОФ3 – при 1.4, 2.4 и 3.25 эВ.

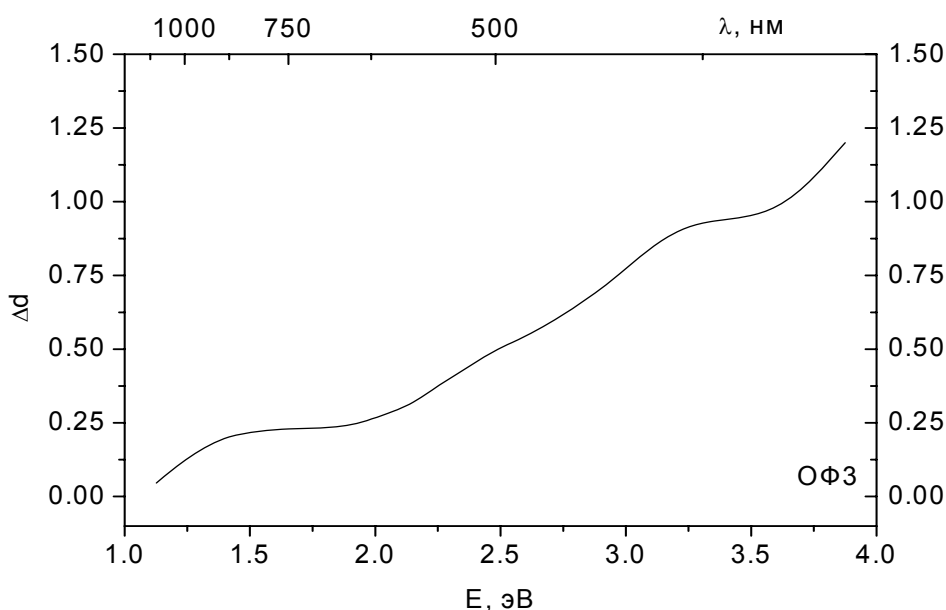


Рис. 5.26. Спектр наведенного поглощения стекла ОФ3 после γ -облучения дозой 10^5 Р .

Чтобы понять причину заметного отличия стекол разных типов по радиационно-оптической устойчивости, сравним стекла ЛК6 и ТФ3, первое из которых относится к наиболее, а второе – к наименее устойчивым. Как следует из таблицы 5.3, граница полупропускания $\lambda_{0.5}$ у стекла ТФ3 смещена в длинноволновую сторону на 61 нм по сравнению с таковой у стекла ЛК6. Это говорит о том, что даже с учетом, может быть, разного вклада примесного поглощения в формирование границы пропускания сравниваемых стекол край фундаментального поглощения у стекла ТФ3 примерно на 60 нм сдвинут в сторону более длинных волн по сравнению со спектром фундаментального поглощения стекла ЛК6. Как отмечалось в разделе 4.1, к длинноволновому краю спектра фундаментального поглощения примыкает спектр образования центров окраски. Иными словами, на шкале длин волн центры тяжести полос поглощения радиационных центров окраски у стекла ТФ3 расположены дальше, чем у стекла ЛК6. Следствием этого является, по-видимому, более сильное, чем у стекла ЛК6, перекрытие спектра поглощения облученного стекла ТФ3 с кривой видности человеческого глаза. В самом деле, когда мы говорим о приращении интегральной оптической плотности стекла в результате облучения, мы имеем в виду только ослабление видимого света радиационными центрами окраски. Поэтому, если бы полосы поглощения центров окраски появлялись только в УФ области спектра, человеческий глаз не был бы способен выявить никаких изменений в характере пропускания света стеклом до и после облучения.

Таблица 5.3. Граница полупропускания типовых оптических стекол, $\lambda_{0,5}$, до и после γ -облучения.

Стекло	ЛК6	ФК14	ТФК1	К8	БК6	ТК20	СТК19
0 Р	321	343	358	320	322	347	341
10^4 Р	339	-	-	343	345	359	362
10^5 Р	463	640	-	540	690	574	638
Стекло	КФ6	БФ21	ТБФ4	ЛФ5	Ф4	ТФ3	ОФ3
0 Р	317	348	382	335	350	372	340
10^4 Р	360	398	412	399	381	399	368
10^5 Р	533	624	553	601	720	776	585

Как видно из этой таблицы, после облучения самое устойчивое к действию γ -излучения стекло ЛК6 характеризуется самыми низкими, а стекло ТФ3, которое, как говорилось, наименее устойчиво к действию γ -квантов, – практически самыми высокими значениями $\lambda_{0,5}$. Стекло КФ6 по радиационно-оптической устойчивости уступает только стеклу ЛК6 (табл. 5.3), и значения $\lambda_{0,5}$ у него меньше, чем у всех остальных стекол за исключением стекла ЛК6. И такой анализ можно провести для любого стекла, представленного в таблицах 5.1 и 5.3, и прийти к выводу, что, чем сильнее смещается с дозой в длинноволновую сторону граница пропускания стекла, тем ниже его радиационно-оптическая устойчивость к γ -излучению.

А теперь перейдем от типовых стекол ко всему каталогу оптических стекол и попытаемся дать общую характеристику их радиационно-оптической устойчивости на основе данных о приращении интегральной оптической плотности, Δd , вызванном γ -облучением дозами в 10^4 и 10^5 Р. Будем при этом считать стекла слабо окрашивающимися, если уменьшение пропускающей способности в видимой области спектра, ΔT , не превосходит 10 %, средне окрашивающимися, если ее снижение лежит в пределах от 10 до 20 %, и сильно окрашивающимися, если степень ослабления пропускания находится в пределах от 20 до 30 %. Как следует из рис. 2.8, для первой группы стекол значения Δd не должны превосходить 0.045, для второй и третьей групп – находиться в пределах от 0.050 до 0.100 и от 0.105 до 0.160, соответственно. В таблице 5.4 значения Δd приведены для дозы в 10^4 Р. Из этой таблицы видно, что подавляющее число стекол почти поровну поделено между первой и второй группами и лишь незначительная их часть - 3 стекла типа ТФ и по одному стеклу типа БФ и Ф - относится к третьей группе, т. е. к группе сильно окрашивающихся стекол. Отметим, что к первой группе относятся все стекла типа ЛК и К и почти все стекла типа ТК, а ко второй группе – все стекла типа СТК и почти все стекла типа ТБФ и Ф. Остальные из

неназванных типов стекол представлены как в первой, так и во второй группах. Диапазон значений Δd при переходе от стекла к стеклу каталога достаточно широк – от 0.010 до 0.130, наиболее устойчивыми к γ -излучению с дозой 10^4 Р являются кроновые стекла (стекла типа ЛК, ФК и К), а наименее устойчивыми – флинтовые стекла (стекла типа Ф и ТФ).

Таблица 5.4. Интегральная оптическая плотность наведенного поглощения оптических стекол в видимой области спектра после γ -облучения дозой 10^4 Р.

Сильно окрашивающиеся стекла (ΔT от 20 до 30 %)		Средне окрашивающиеся стекла (ΔT от 10 до 20 %)		Слабо окрашивающиеся стекла ($\Delta T \leq 10$ %)	
Стекло	Δd	Стекло	Δd	Стекло	Δd
ТФ5	0.105	БК10, СТК9, СТК12, СТК19, КФ4, БФ11,	0.050	ЛК6, ЛК7, ЛК8, ФК11	0.010
ТФ13	0.110	БФ23, ТБФ9, ТБФ10, Ф9		ЛК3, ЛК4, ЛК5, К1, ТК8, КФ8	0.015
БФ28, ТФ3	0.120	ФК13, БК4, ТФ11	0.055	К2, ЛФ9, ЛФ12, ОФ2	0.020
Ф4	0.130	ТФК1, ТК17, СТК3, СТК10, БФ7, БФ16, ТБФ8, ТФ7, ОК1, ОФ4	0.060	К15, ТК2, ЛФ8, ЛФ10, ОФ1	0.025
		БК6, БК9, БФ6, Ф8, Ф18, ОФ5	0.065	ЛК1, К17, БК11, БК13, ТК9, КФ6, КФ7, БФ1, ЛФ1	0.030
		ФК14, ТФК11, БФ8, БФ12, БФ13, БФ21, БФ25, ТБФ3, ЛФ5, Ф7, ТФ12	0.070	К3, К8, БК12, ТК12, БФ19, ТБФ4	0.035
		СТК16, ТФ8	0.075	К5, К14, К18, К19, К20, БК8, ТК1, ТК4, ТК13, ТК14, ТК16, ТК20, ТК23, КФ1, КФ5, БФ4, ОФ3	0.040
		СТК7, СТК8, СТК20, БФ24, ЛФ7, ЛФ11, Ф13, ТФ2, ТФ4	0.080	ТК21, БФ18, ОК2	0.045
		ФК24	0.085		
		ТФ1	0.090		
		БФ26, Ф2, СТФ2	0.095		
		Ф1, Ф6, ТФ10	0.100		

Если сопоставить данные таблиц 5.3 и 5.4, можно заметить, что тенденция изменения устойчивости к γ -излучению с дозой в 10^4 Р при переходе от одного типа стекол к другому качественно передается ими одинаково. Это означает, что при предварительном выборе стекол для приборов специального назначения, которые предназначены для работы в радиационных полях с умеренными экспозиционными дозами ($\sim 10^4$ Р), можно пользоваться обоими критериями, т. е. выбирать стекла с минимально возможными значениями $\lambda_{0,5}$ и Δd . Окончательный же выбор стекол следует делать с учетом, во-первых, их спектров пропускания, измеренных после облучения, а во-вторых, реальных значений толщины оптических элементов, входящих в состав прибора. В действительности длина оптического пути в оптических элементах приборов может составлять десятки сантиметров, тогда как в названных таблицах приведены значения ΔT и Δd для толщины стекол в 1 см. Само собой разумеется, что претендентами на использование в приборах специального назначения должны служить стекла первой группы таблицы 5.4, в крайнем случае, стекла второй группы из самой ее верхней части. В сумме это составляет более 50 марок стекол, что может позволить рассчитать схему требуемого прибора.

При более высоких дозах облучения стекла, отнесенные к разряду слабо окрашивающихся при дозе в 10^4 Р, также могут быть условно разделены на 3 группы (табл. 5.5) в зависимости от степени радиационного окрашивания (от средней до очень сильной). Как следует из этой таблицы, при дозе в 10^5 Р лишь у стекол 9 марок снижение пропускающей способности в видимой области спектра находится в диапазоне от 10 до 20 %, у стекол 10 других марок – от 20 до 30 %, тогда как у стекол остальных 36 марок ее снижение превосходит 30 %. Так, стекла с $\Delta d > 0.30$ утрачивают пропускающую способность более чем наполовину. Понятно, что эти стекла ни при каких обстоятельствах нельзя использовать в приборах специального назначения, если известно, что они должны функционировать в радиационных полях с высокими экспозиционными дозами (10^5 Р и более).

Таким образом, результаты, представленные и проанализированные в настоящем разделе, позволяют говорить о том, что бесцветные оптические стекла можно считать устойчивыми к γ -излучению только тогда, когда экспозиционная доза не превосходит нескольких тысяч рентген. При более высоких дозах облучения (10^4 Р и более) радиационные центры окраски настолько сильно снижают пропускающую способность стекол, что они становятся непригодными к использованию в визуальных оптических приборах специального назначения, т. е. в приборах, рассчитанных на эксплуатацию в радиационных полях с экспозиционными дозами, превышающими 10^4 Р. О том, как бороться с этим явлением, речь пойдет в следующей главе.

Таблица 5.5. Интегральная оптическая плотность наведенного поглощения оптических стекол в видимой области спектра после γ -облучения дозой 10^5 Р.

Очень сильно окрашивающиеся стекла ($\Delta T > 30\%$)		Сильно окрашивающиеся стекла (ΔT от 10 до 30 %)		Средне окрашивающиеся стекла (ΔT от 10 до 20 %)	
Стекло	Δd	Стекло	Δd	Стекло	Δd
КФ6, КФ7	0.180	ЛК3, ЛК5,	0.120	ТК8, ТК9,	0.080
К15, ТК2, БФ1	0.200	ЛФ9, ОФ1,		КФ8,	
КФ1	0.210	ОФ2		ЛФ10	
ТК4, КФ5, ЛФ1	0.220				
ЛК1	0.240	ЛК4, К1	0.130	ФК11	0.085
К5, БК12, БК13, ТК13,	0.250				
БФ19		К2, ТБФ10	0.150	ЛК6,	0.100
К8, ТК1	0.260			ЛК7,	
К17, ТК12, ТК21	0.270	ЛФ12	0.160	ЛК8, ЛФ8	
К14, БФ4	0.280				
К19, БК8, ТК16	0.290				
К3, К18, БК11, ТК14,	0.300				
ТК20, ТБФ4					
БФ18	0.310				
ОФ3	0.320				
ОК2	0.330				
ТК23	0.350				
К20	0.380				

5.3. Образование радиационных центров окраски в оптических стеклах под действием корпускулярного излучения

Данные по радиационно-оптической устойчивости оптических стекол к корпускулярному излучению представлены в нормативно-технической литературе для случая их облучения электронами. При таком облучении варьировались энергия электронов (2.0, 5.0, 8.5 МэВ) и плотность их потока (примерно от 10^{11} до 10^{14} см⁻²). Требуемые потоки электронов набирались варьированием длительности облучения. Облучение стекол электронами с энергией 2.0 МэВ производилось на линейном ускорителе Л-10 при плотности потока в $3 \cdot 10^{10}$ см⁻²·с⁻¹ и толщине образцов в 4 мм. Температура образцов в ходе облучения была не более 50 °С. В качестве источника электронов с энергиями 5.0 и 8.5 МэВ использовался линейный ускоритель У-13 с плотностями потока в $6.25 \cdot 10^9$

и $6.25 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Испытания стекол проводились на образцах толщиной 10 мм, их температура при облучении не превышала 30°C . Измерения спектров пропускания при энергии электронов в 2.0 МэВ проводились через сутки после прекращения облучения, а для электронов с энергиями в 5.0 и 8.5 МэВ – через 10 минут. Сказанное означает, что при сравнительном анализе результатов действия электронов с разными энергиями на пропускающую способность стекол следует иметь в виду, что доля центров окраски, которые успевают распасться за сутки, заметно превосходит таковую для случая 10-минутного интервала между окончанием облучения и началом измерения спектров пропускания облученных стекол. Кроме спектров пропускания, определялись также приращения оптической плотности, Δd , стекол на разных длинах волн, зависимость границы пропускания облученных стекол от параметров электронного облучения, а также длины пробега, L , электронов в стеклах и толщины, $l_{\text{эф}}$, окрашенного слоя.

При облучении стекол электронами длина их пробега в стекле и толщина окрашенного слоя зависят от плотности стекла и энергии частиц, E_e , (рис. 5.27). Так, при $E_e = 2 \text{ МэВ}$ L изменяется в пределах от 1.4 до 4.0 мм при переходе от более плотных стекол к менее плотным, в чуть меньших пределах варьируется величина $l_{\text{эф}}$. При $E_e = 5.0 \text{ МэВ}$ значения L и $l_{\text{эф}}$ лежат в диапазонах (5.2 – 17.0) и (3.4 – 9.2) мм, соответственно, а при $E_e = 8.5 \text{ МэВ}$ – в диапазонах (8.8 – 25.0) и (5.7 – 15.0). Для стекла ЛК5, например, L равно 3.6 мм при $E_e = 2.0 \text{ МэВ}$, 13.3 мм при $E_e = 5.0 \text{ МэВ}$ и 20.8 мм при $E_e = 8.5 \text{ МэВ}$, а $l_{\text{эф}}$ при указанных энергиях - 3.0, 9.2 и 15.0 мм.

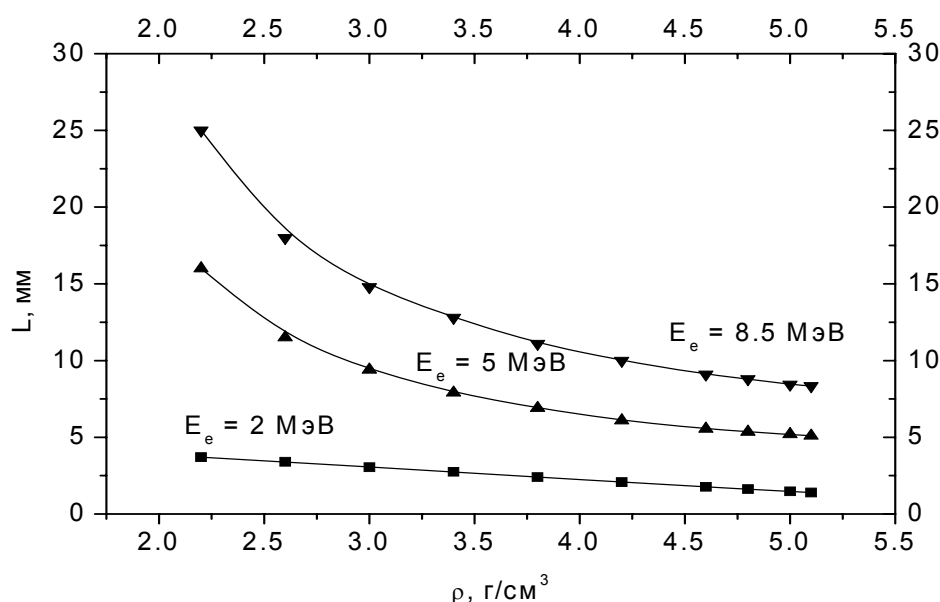


Рис. 5.27. Зависимость длины пробега электронов с энергией 2.0, 5.0 и 8.5 МэВ в оптических стеклах от их плотности.

Таблица 5.6 дает представление о том, в каких пределах изменяется плотность оптических стекол разного типа, а также о числе марок для каждого из них. Эти данные, а также данные рис. 5.27 позволяют приблизительно прогнозировать длину пробега электронов в стеклах разного типа. Для более точного ее предсказания в случае конкретных марок стекол нужно, разумеется, знать их плотности. При одной и той же энергии электронов эффективность окрашивания стекол зависит от потока (табл. 5.7). После облучения электронами с энергией 2.0 МэВ и потоком в 10^{12} см^{-2} у некоторых стекол толщиной в 4 мм (ЛК5, К8) пропускающая способность в видимой области спектра снижается примерно в такой же степени, как после их облучения γ -квантами дозой 10^5 Р при толщине в 10 мм. У других стекол (БК6, КФ6) облучение электронами с указанными характеристиками вызывает более слабое снижение пропускающей способности в видимой области спектра, чем γ -облучение дозой в 10^5 Р , но более сильное, чем это же облучение дозой в 10^4 Р . Наконец, у некоторых стекол (Ф4 и ТФ3) это снижение после облучения электронами с потоком 10^{12} см^{-2} почти такое же, как после γ -облучения дозой 10^4 Р . Далее, данные табл. 5.7 свидетельствуют о том, что по своей структуре спектры пропускания одного и того же стекла после облучения электронами и γ -квантами несколько отличаются друг от друга: относительное снижение пропускающей способности стекол в длинноволновой части видимого диапазона после облучения электронами выражено более сильно, чем после γ -облучения. При более высоких значениях потока электронов с энергией 2.0 МэВ почти все стекла утрачивают пропускающую способность до такой степени, что становятся непригодными для использования в оптическом приборостроении специального назначения.

Таблица 5.6. Плотность оптических стекол.

№ пп.	Тип стекла	Число марок	ρ , г/см ³	№ пп.	Тип стекла	Число марок	ρ , г/см ³
1.	ЛК	6	2.25 – 2.42	2.	КФ	3	2.51 – 2.57
3.	К	8	2.38 – 2.76	4.	ЛФ	7	2.54 – 3.23
5.	БК	5	2.76 – 3.12	6.	ФК	3	2.60 – 3.39
7.	ОФ	5	2.56 – 3.60	8.	БФ	16	2.67 – 3.96
9.	ТК	12	3.06 – 3.98	10.	Ф	7	2.93 – 3.67
11.	ОК	2	3.77 – 3.82	12.	СТК	10	3.46 – 4.61
13.	ТФ	11	3.14 – 5.19	14.	ТБФ	7	4.17 – 5.02
15.	СТФ	3	6.13 – 6.79				

Из сказанного, очевидно, можно сделать три вывода. Во-первых, между радиационно-оптической устойчивостью стекол к фотонному и

корпускулярному излучению нет прямой связи: какие-то стекла отличаются более высокой устойчивостью к γ -излучению, другие – к воздействию электронов. Во-вторых, для электронов с энергией 2.0 МэВ предельные значения потока, при которых стекла еще сохраняют приемлемую пропускающую способность, не превышают $10^{11} - 10^{12} \text{ см}^{-2}$. В-третьих, относительные концентрации центров окраски разного типа изменяются при переходе от одного вида облучения к другому.

Таблица 5.7. Пропускание типовых стекол в видимой области спектра после облучения γ -квантами и электронами.

Марка стекла	λ , нм	Пропускание, %, при облучении			
		γ -квантами при дозах $10^5 (10^4) \text{ P}$	электронами ($E = 2 \text{ МэВ}$) при потоках		
			10^{12} см^{-2}	10^{13} см^{-2}	10^{14} см^{-2}
ЛК5	400	20.0	24.7	5.9	0.0
	500	45.2	48.7	22.2	7.7
	600	61.3	65.9	39.6	22.9
	700	78.4	75.9	53.3	36.8
К8	400	21.3	24.7	2.0	0.0
	500	38.0	41.0	16.7	4.7
	600	55.3	55.3	31.1	19.3
	700	72.7	68.4	49.1	35.3
БК6	400	8.5	23.3	7.2	0.0
	500	16.5	40.4	17.3	2.3
	600	31.3	51.5	28.0	8.4
	700	48.7	64.8	39.1	18.7
КФ6	400	2.5	15.2	0.0	–
	500	30.0	41.3	15.3	–
	600	71.6	70.4	56.9	–
	700	78.7	75.3	66.7	–
Ф4	400	0.0 (46.7)	38.7	20.1	6.4
	500	5.9 (61.6)	58.7	44.0	25.6
	600	27.2 (72.7)	73.3	64.0	49.3
	700	42.1 (79.3)	81.3	74.7	64.0
ТФ3	400	4.3 (34.1)	37.0	17.3	2.7
	500	14.1 (62.0)	55.3	34.0	12.0
	600	34.9 (73.6)	64.0	50.7	29.3
	700	54.0 (80.8)	72.0	64.0	48.0

Данные о приращении интегральной оптической плотности, Δd , поглощения в видимой области спектра, наведенного облучением электронами, в нормативно-технической литературе отсутствуют. Если же

вместо нее при сравнении стекол использовать величину приращения оптической плотности в зеленой области спектра, $\Delta d(560 \text{ нм})$, то при облучении стекол электронами с энергией 2.0 МэВ в зависимости от потока можно выделить 3 группы стекол: очень сильно окрашивающиеся стекла [$\Delta T(560 \text{ нм}) > 30 \%$], сильно окрашивающиеся стекла [$\Delta T(560 \text{ нм})$ от 20 до 30 %] и стекла со средним уровнем наведенного поглощения [$\Delta T(560 \text{ нм})$ от 10 до 20 %]. Для потока электронов в 10^{12} см^{-2} значения $\Delta d(560 \text{ нм})$ находятся в диапазоне от 0.05 до 0.29, и эти группы выглядят следующим образом (табл. 5.8).

Таблица 5.8. Оптическая плотность наведенного поглощения в зеленой области спектра после облучения стекол электронами с энергией 2.0 МэВ и потоком в 10^{12} см^{-2} .

Очень сильно окрашивающиеся стекла (4 мм)		Сильно окрашивающиеся стекла (4 мм)		Средне окрашивающиеся стекла (4 мм)	
Стекло	$\Delta d(560 \text{ нм})$	Стекло	$\Delta d(560 \text{ нм})$	Стекло	$\Delta d(560 \text{ нм})$
БФ6, БФ13	0.20	БК11, ТК16 Ф8, Ф13	0.14	ТК4 ТК8	0.05
КФ4	0.22	ТФ3	0.14	ЛК3	0.07
К8	0.24	КФ6, Ф4	0.15	ЛК5	0.07
К19	0.25	ТФ8	0.15	ЛК7	0.07
БК4	0.25	К2, ТК14	0.16	ТК2	0.09
БК6	0.29				

Остальные стекла оптического каталога располагаются в промежутках между этими группами. Для потока электронов в 10^{13} и 10^{14} см^{-2} значения $\Delta d(560 \text{ нм})$ изменяются в границах от 0.17 до 0.55 и от 0.33 до 1.03, соответственно. При этом границы названных выше групп стекол с ростом потока размываются, и при более высоких потоках стекла соседних по степени окраски групп могут демонстрировать одинаковые или близкие значения $\Delta d(560 \text{ нм})$. Так, например, стекла БФ13 и Ф8, находившиеся в группах стекол, очень сильно и сильно окрашивающихся при потоке в 10^{12} см^{-2} , характеризуются одним и тем же значением $\Delta d(560 \text{ нм}) = 0.60$ при потоке в 10^{14} см^{-2} . Качественно аналогичное утверждение справедливо и для стекол сильно (К2) и средне (ТК2) окрашивающихся при потоке в 10^{12} см^{-2} стекол: при потоке в 10^{14} см^{-2} значения $\Delta d(560 \text{ нм})$ у них равны 0.45 и 0.43, соответственно. Понятно, что ни одно из стекол оптического каталога при потоках в 10^{13} и 10^{14} см^{-2} не может считаться устойчивым к действию электронов с энергией 2.0 МэВ.

Как следует из рис. 5.27, с ростом энергии электронов увеличивается их длина пробега в стекле, возрастает также и толщина окрашенного слоя. Казалось бы, при этом должна возрастать и эффективность окрашивания стекол электронами, особенно если учесть, что при E_e , равной 5.0 и 8.5 МэВ, толщина экспериментальных образцов составляет не 4, а 10 мм. На самом же деле оказывается, что при близких потоках у стекол толщиной 4 мм при энергии электронов в 2.0 МэВ и толщиной в 10 мм при более высоких энергиях наблюдается почти одинаковое снижение пропускающей способности в видимой области спектра (табл. 5.7 и 5.9).

Таблица 5.9. Пропускающая способность стекла ЛК5 толщиной 10 мм при облучении электронами с разными характеристиками.

λ , нм	$E_e = 5.0$ МэВ		$E_e = 8.5$ МэВ	
	$1.3 \cdot 10^{12}$ см ⁻²	$1.3 \cdot 10^{13}$ см ⁻²	$1.3 \cdot 10^{12}$ см ⁻²	$1.3 \cdot 10^{13}$ см ⁻²
400	24.0	0.0	33.3	0.0
500	64.0	10.0	69.3	16.0
600	77.3	32.0	82.7	34.7
700	86.0	60.0	88.0	62.7

Более того, как следует из табл. 5.9, у стекла ЛК5 при $E_e = 5.0$ МэВ пропускающая способность снижается в большей степени, чем при $E_e = 8.5$ МэВ. Одна из причин такого соотношения состоит, конечно, в том, что толщина окрашенного слоя при таком изменении энергии электронов изменяется от 9.2 до 15.0 мм, тогда как толщина образцов стекла в том и другом случае одна и та же – 10 мм. Другая причина менее эффективного окрашивания одного и того же слоя стекла электронами более высоких энергий состоит, по-видимому, в том, что удельные потери энергии электронов на ионизацию атомов стекла и – как следствие – на образование радиационных центров окраски у электронов с большей энергией из-за их более высокой скорости проникновения в стекло оказываются более низкими, чем у электронов с меньшей энергией.

Как и в случае γ -облучения, о степени устойчивости стекол к электронам можно косвенно судить по смещению их границы пропускания: чем при большей длине волны оказывается граница пропускания, тем меньше радиационно-оптическая устойчивость в видимой области спектра. Так, известно, что при $E_e = 5.0$ МэВ величина смещения границы пропускания стекол при потоке в $1.3 \cdot 10^{12}$ см⁻² лежит в зависимости от марки стекла в очень широком диапазоне от десятков до сотен нм, поэтому у некоторых стекол граница пропускания после облучения электронами с указанными параметрами пучка будет все еще находиться в УФ области спектра, а у других она будет располагаться уже

в видимой области. Соответственно, стекла первого типа будут в среднем демонстрировать меньшие значения приращения оптической плотности в видимой области спектра, т. е. будут более устойчивыми к действию электронов, а стекла второго типа – большие приращения, т. е. будут менее устойчивыми (табл. 5.10). Данные по положению границы пропускания некоторых из представленных в этой таблице стекол нельзя рассматривать как надежные из-за того, что они очень скудно представлены в нормативно-технических документах, тем не менее можно считать, что они подтверждают отмеченную выше взаимосвязь между положением границы пропускания облученных стекол и их устойчивостью к окрашивающему действию электронов.

При более высоких потоках электронов с энергией 5.0 МэВ границы пропускания стекол смещаются в сторону больших длин волн, поэтому для многих стекол граница пропускания даже при потоке электронов в $1.3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ оказывается едва ли не в ИК области спектра, не говоря уже о более высоких потоках. Это же утверждение справедливо и для электронов с энергией 8.5 МэВ. Это означает, что с точки зрения радиационно-оптической устойчивости оптических стекол к электронам потоки в $10^{11} - 10^{12} \text{ см}^{-2}$ следует рассматривать в качестве предельно допустимых не только для электронов с энергией в 2.0 МэВ, но и для более высокоэнергетических электронов.

Таблица 5.10. Примерные значения $\lambda_{0.5}$ и $\Delta d(560 \text{ нм})$ типовых оптических стекол после облучения электронами с энергией 5.0 МэВ и потоком в $1.3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

Марка стекла	$\lambda_{0.5}$, нм	$\Delta d(560 \text{ нм})$
ЛК5	345	0.10
ФК14	600	0.45
К8	410	0.12
БК6	550	0.26
ТК20	500	0.22
СТК19	580	0.33
КФ6	550	0.26
БФ21	550	0.39
ЛФ5	555	0.40
Ф4	600	0.46
ТФ3	615	0.56