

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ НА ИМПУЛЬСНУЮ ЗАСВЕТКУ

© 2009 г. А. Г. Бедрин, канд. физ.-мат. наук; И. С. Миронов, канд. техн. наук;
П. Н. Роговцев, канд. техн. наук

Научно-исследовательский институт комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем г.Сосновый Бор, Ленинградская область

E-mail: contact@niiki.ru, bedrin@sbor.net

Приведены результаты исследования воздействия импульсного излучения сплошного спектра, создаваемого плазменным источником света на основе магнитопржатого разряда, на фоточувствительные элементы оптико-электронных приборов. Определены пороговые значения энергетической экспозиции, вызывающие уменьшение фототока кремниевого элемента солнечной батареи, обратимые изменения чувствительности кремниевого фотодиода и обратимые изменения чувствительности и разрешающей способности кремниевого матричного фотоприемника с накоплением заряда.

Коды OCIS: 040.1520, 040.5160, 040.6040

Поступила в редакцию 03.03.2009

При исследовании устойчивости фоточувствительных элементов оптико-электронных приборов (ОЭП) к воздействию световых импульсов основное внимание уделяется определению пороговой энергетической экспозиции, выводящей фотоприемное устройство (ФПУ) из строя. Несмотря на то, что результаты воздействия светового излучения на ФПУ в значительной степени зависят от спектрального состава и характера его изменения во времени, в качестве источников излучения при таких исследованиях, как правило, используются лазеры [1, 2] либо устройства, воспроизводящие излучение Солнца [3, 4]. При измерении пороговой энергетической экспозиции разрушения ФПУ определяются его характеристики до и после воздействия.

Для ФПУ, работающих в составе приборов с высоким временным и пространственным разрешением высокой чувствительностью, важным оказывается исследование воздействия относительно слабых импульсных световых потоков. Изменение характеристик ФПУ, вызванное таким воздействием, может носить обратимый характер, что требует диагностики характеристик ФПУ в процессе облучения.

В данной работе воздействие на ФПУ осуществлялось импульсным немонахроматическим излучением сплошного спектра. Наряду с

определением пороговых значений энергетической экспозиции, приводящих к возникновению необратимых изменений характеристик ФПУ, большое внимание в работе уделено исследованию обратимых изменений этих характеристик при воздействии слабых потоков светового излучения.

Исследования реакции фоточувствительных элементов на импульсную засветку проводились на стенде с магнитопржатым разрядом (МПР) [5]. Импульсный излучатель на основе МПР имеет площадь излучающей поверхности 120 см^2 . Излучение плазмы МПР близко к излучению абсолютно черного тела. Спектр излучения – сплошной. Энергетическая светимость разряда составляет примерно 200 кВт/см^2 . При длительности светового импульса порядка 10^{-3} с плотность энергии излучения превышает 200 Дж/см^2 . Со всей поверхности разряд излучает до 30 кДж . Из-за экранировки излучения холодной оболочкой яркостные температуры изменяются от 15 000 К в ультрафиолетовой (УФ) области спектра до 30 000 К – в красной. На рис. 1 представлена зависимость энергетической экспозиции от расстояния до излучающей поверхности плазмы МПР.

Такие параметры излучателя позволяют проводить испытания элементов оптико-электронной

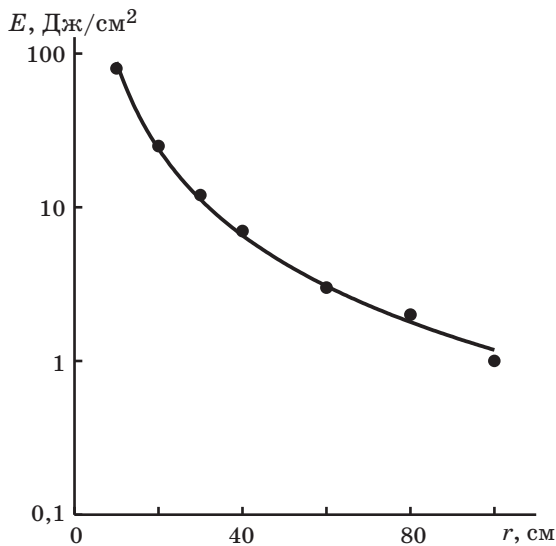


Рис. 1. Зависимость энергетической экспозиции от расстояния до излучающей поверхности плазмы МПР.

аппаратуры в условиях воздействия световых помех техногенного и естественного происхождения как при прямом попадании светящейся области в поле зрения ОЭП, так и при засветке элементов ОЭП отраженным и рассеянным излучением.

Испытания кремниевых элементов солнечных батарей (ЭСБ) с защитным стеклом, закрепленным на всей поверхности кремниевой пластины с помощью клеевого слоя, проводились при энергетической экспозиции 5–20 Дж/см². При испытаниях измерялись средняя за импульс облученность P и энергетическая экспозиция E в спектральном интервале 186–2000 нм, а также средняя облученность $P_{\Delta\lambda}$ и энергетическая экспозиция $E_{\Delta\lambda}$ в полосе поглощения защитного стекла ЭСБ $\Delta\lambda = 186\text{--}350$ нм. Степень поражения ЭСБ оценивалась по уменьшению тока короткого замыкания, возникающего под действием эталонного источника света (ртутной лампы). Режим излучения ртутной лампы устанавливался с помощью контрольного ЭСБ. Измерение фототока испытываемой ЭСБ в поверочном режиме

ртутной лампы проводилось непосредственно перед испытаниями (I_p), сразу после испытаний (I'_p) и спустя 2 часа. Отличий в измерениях I'_p сразу по окончании испытаний и спустя 2 ч не обнаружено. Результаты испытаний приведены в табл. 1.

Результаты испытаний показывают линейную корреляцию между уменьшением фототока ЭСБ и энергетической экспозицией. На рис. 2 показана зависимость относительного уменьшения фототока $\Delta I/I = (I_p - I'_p)/I_p$ от эффективной энергетической экспозиции в полосе пропускания защитного стекла ЭСБ $E_{\text{эф}} = E - E_{\Delta\lambda}$.

Если аппроксимировать зависимость на рис. 2 до значения $\Delta I/I = 1$, то порог лучевой прочности ЭСБ составит 30 Дж/см², что в точности совпадает со значением порога лучевой прочности при воздействии лазерного излучения с $\lambda = 1,06$ мкм при длительности импульса 10^{-3} с [1]. При воздействии лазерного импульса с $\lambda = 0,69$ мкм длительностью $2,5 \times 10^{-8}$ с энергетический порог уменьшения фототока составляет 0,25–1,5 Дж/см² [2], а при воздействии импульса

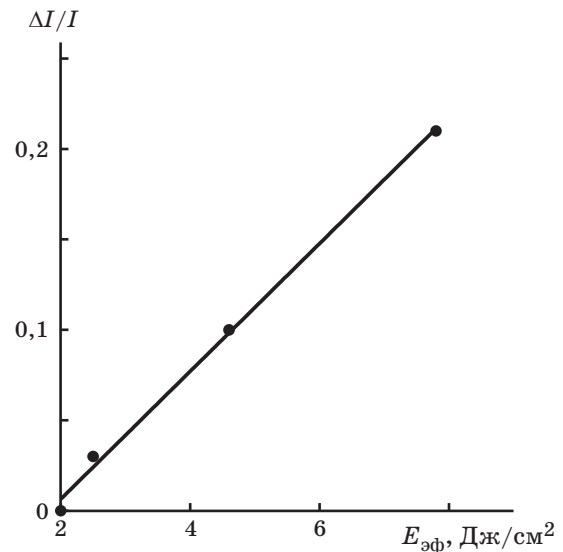


Рис. 2. Зависимость относительного уменьшения фототока ЭСБ от эффективной энергетической экспозиции.

Таблица 1. Результаты испытаний ЭСБ

$E, \text{ Дж/см}^2$	$P, \text{ Вт/см}^2$	$E_{\Delta\lambda}, \text{ Дж/см}^2$	$P_{\Delta\lambda}, \text{ Вт/см}^2$	$I_p, \text{ мА}$	$I'_p, \text{ мА}$	$(I_p - I'_p)/I_p$
19,5	$2,8 \times 10^4$	11,7	$1,7 \times 10^4$	126	100	0,21
11,6	$1,7 \times 10^4$	7,0	10^4	122	110	0,10
6,3	9×10^3	3,8	$5,4 \times 10^3$	120	116	0,03
5,0	$7,1 \times 10^3$	3,0	$4,3 \times 10^3$	124	124	0

излучения сплошного спектра длительностью $10^{-3} - 2$ Дж/см².

При $E_{эф} > 2$ Дж/см² поверхность защитного стекла ЭСБ растрескивается. Для выяснения причины разрушения защитного стекла ЭСБ проведены световые испытания стекол К8. При интегральной по спектру энергетической экспозиции $E < 35$ Дж/см² никаких изменений со стеклом не происходит. При $E = 35$ Дж/см² (30% в области $\Delta\lambda = 185-300$ нм, 35% в области $\Delta\lambda = 300-450$ нм, 35% в области $\Delta\lambda = 450-2000$ нм) происходит незначительное (до 5%) уменьшение пропускания, связанное с образованием центров окраски под действием УФ излучения в области границы пропускания стекла [6].

Проведенные испытания показывают, что импульсы облучения, вызывающие изменение фототока ЭСБ, не могут разрушить защитные стекла панелей. Разрушение стекол происходит под действием паров клеевого слоя, образующихся под защитным стеклом при облучении ЭСБ. В результате растрескивания стекла уменьшается его пропускание и снижается фототок ЭСБ. Такой механизм разрушения защитного стекла усугубляется низким давлением окружающей среды, в которой преимущественно функционируют ЭСБ.

Исследование изменения характеристик кремниевых фотодиодов проводилось при экспозициях $E = 10^{-5}-20$ Дж/см² и длительности импульса порядка 10^{-3} с [7]. При $E > 20$ Дж/см² фотодиод выходит из строя. В диапазоне $10^{-4} < E < 20$ Дж/см² происходит уменьшение чувствительности фотодиода в процессе облучения вплоть до полной ее потери. Восстановление чувствительности до исходного уровня происходит за время, превышающее длительность засветки на три порядка, наблюдается эффект обратимого ослепления фотодиодов.

ОЭП с фотоприемниками на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС) обладают преимуществами с точки зрения реализации пространственной селекции и раздельного наблюдения нескольких объектов. Такие приборы имеют высокую чувствительность и высокую разрешающую способность, которые должны сохраняться в условиях воздействия на ОЭП естественных и искусственных световых помех [8].

Исследования изменения чувствительности и разрешающей способности кремниевой ПЗС-матрицы, имеющей 128 строк по 256 чувствительных элементов в каждой строке, проводились на установке, состоящей из канала регистрации излучения МПР и канала засветки ПЗС-матрицы

с тест-объектом. Контроль параметров излучения МПР в трех спектральных интервалах осуществлялся калиброванными фотоэлементами Ф-17, Ф-22 и Ф-21 со светофильтрами. Засветка матрицы излучением МПР в спектральном интервале $\lambda \geq 300$ нм проводилась через объектив, проектирующий на нее изображение излучающей поверхности разряда. Ослабление излучения МПР для изменения энергетической экспозиции на ПЗС-матрице осуществлялось нейтральными фильтрами. В качестве тест-объекта, наблюдаемого на фоне засветки, использовалась мира с двумя прозрачными щелями, освещаемая ртутной лампой. Изображение миры с помощью полупрозрачного зеркала вводилось в канал засветки и проектировалось на ПЗС-матрицу объективом. УФ излучение МПР с $\lambda < 300$ нм отсекалось светофильтром БС-3. Схема регистрации сигналов видеоконтрольного устройства осуществляет накопление и последовательное считывание заряда со строк матрицы. Отображение сигналов отдельных строк с регулируемой задержкой осуществляется на экране осциллографа.

Для определения динамического диапазона ПЗС-матрицы с видеоконтрольным устройством проведены измерения амплитуды сигнала матрицы в зависимости от энергетической экспозиции в трех спектральных интервалах: 300–400, 400–700 и 700–1100 нм. При облучении матрицы в спектральных интервалах $\Delta\lambda = 300-400$, 400–700 и 700–1100 нм энергетическая экспозиция менялась в пределах $10^{-7}-10^{-5}$, $10^{-8}-10^{-6}$ и $10^{-9}-3 \times 10^{-6}$ Дж/см² соответственно.

Исследования проводились в покадровом режиме работы видеоконтрольного устройства, когда после накопления сигнала всеми строками осуществлялось последовательное считывание сигналов с ячеек каждой строки. Частота считывания – 1 МГц. При этом длительность считывания всего кадра составляла 33 мс. После считывания происходит очищение ячеек от накопленного заряда с той же частотой. Таким образом, период считывания кадров составляет 66 мс.

Минимальная энергетическая экспозиция, вызывающая увеличение уровня сигнала ПЗС-матрицы над фоновым, для УФ диапазона составляет 10^{-7} Дж/см². Учитывая, что площадь одного чувствительного элемента матрицы порядка 10^{-6} см², чувствительность кремниевой ПЗС-матрицы в УФ диапазоне спектра составляет 10^{-13} Дж/элемент. Поделив это значение на среднюю по спектральному интервалу энергию фотонов, можно получить минимальное количе-

Таблица 2. Значения E_{\min} , N_{\min} и ΔE для кремниевой ПЗС-матрицы

$\Delta\lambda$, нм	300–400	400–700	700–1100
E_{\min} , Дж/см ²	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}
E_{\min} , Дж/эл	10^{-13}	10^{-14}	10^{-15}
N_{\min} , фотон/эл	10^5	2×10^4	5×10^3
ΔE , Дж/см ²	10^{-7} – 5×10^{-6}	10^{-8} – 10^{-6}	10^{-9} – 10^{-7}

ство фотонов N_{\min} , которое способен зарегистрировать один элемент матрицы.

В табл. 2 для трех спектральных диапазонов приведены значения минимальной энергии E_{\min} и минимального количества фотонов N_{\min} , регистрируемых матрицей, а также диапазон энергетической экспозиции ΔE , в котором матрица работает в линейном режиме; на рис. 3 – зависимость амплитуды сигнала кремниевой ПЗС-матрицы от энергетической экспозиции в разных спектральных интервалах.

Эксперименты показали, что при увеличении энергетической экспозиции за пределы динамического диапазона происходят обратимые изменения чувствительности и разрешающей способности матрицы. Изменение чувствительности ПЗС-матрицы определялось по отношению чувствительности засвеченной матрицы A' и незасвеченной A

$$A'/A = (I'_T - I'_\Phi)/(I_T - I_\Phi),$$

где I'_T и I'_Φ – амплитуды видеосигнала от тест-объекта и уровня фона засвеченной матрицы,

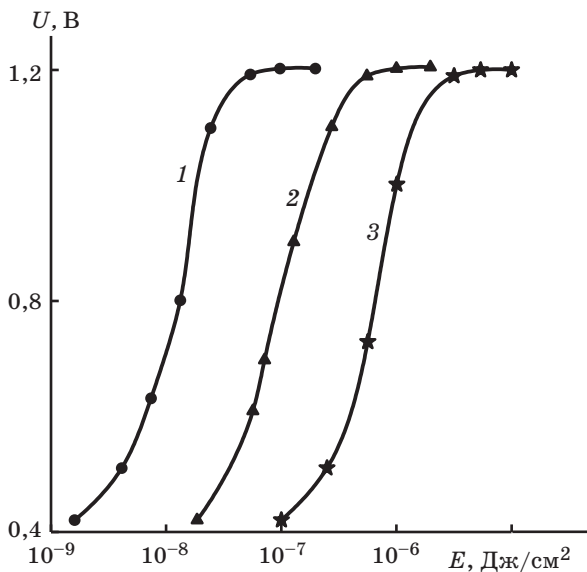


Рис. 3. Зависимости амплитуды сигнала кремниевой ПЗС-матрицы от энергетической экспозиции в спектральном интервале 300–400 нм (1), 400–700 (2) и 700–1100 (3).

I_T , I_Φ – те же параметры для незасвеченной матрицы. Изменение разрешающей способности определялось по отношению разрешающей способности засвеченной (R') и незасвеченной (R) матриц

$$R'/R = \Delta l'/\Delta l,$$

где $\Delta l'$ и Δl – полуширина изображения тест-объекта засвеченной и незасвеченной матриц соответственно.

Доли энергии $E_{\Delta\lambda}/E$ в спектре импульса облучения с учетом пропускания фильтра БС-3 и полупрозрачного зеркала приведены в табл. 3.

Исследования проводились при шести значениях энергетической экспозиции на ПЗС-матрице. Интегральная по спектру энергетическая экспозиция и максимальная облученность, реализованные в экспериментах, приведены в табл. 4.

На рис. 4 представлены видеосигналы, считываемые со строк чувствительных элементов ПЗС-матрицы до облучения, когда матрица регистрирует излучение только от тест-объекта (рис. 4а), и после него (рис. 4б–4и).

В реакции ПЗС-матрицы на импульсную засветку можно выделить две фазы. Первая – фаза резкого увеличения амплитуды фонового видеосигнала. При малых энергетических экспозициях $E = (5 \times 10^{-9} - 10^{-7})$ Дж/см² уровень фона не достигает максимального значения, матрица вместе с фоном регистрирует излучение тест-объекта (рис. 4б). При $E > 10^{-7}$ Дж/см² уровень фона достигает максимального значения, излучение тест-объекта не регистрируется (рис. 4е). При малых E уровень фонового сигнала возвра-

Таблица 3. Спектральное распределение энергии облучения МПР

$\Delta\lambda$, нм	300–400	400–500	500–700	700–200
$E_{\Delta\lambda}/E$	0,57	0,24	0,09	0,08

Таблица 4. Энергетическая экспозиция и максимальная облученность ПЗС-матрицы

E , Дж/см ²	P_{\max} , Вт/см ²
5×10^{-9}	2×10^{-5}
4×10^{-8}	$1,5 \times 10^{-4}$
3×10^{-7}	10^{-3}
5×10^{-6}	0,02
8×10^{-5}	0,3
$1,3 \times 10^{-3}$	4,8

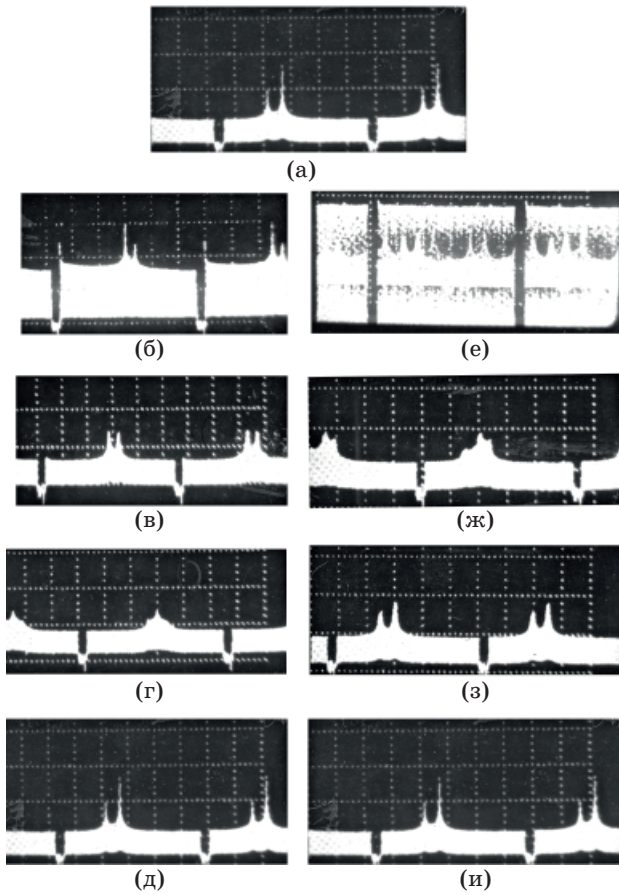


Рис. 4. Осциллограммы видеосигналов ПЗС-матрицы до облучения (а) и после облучения (б–и). $E = 5 \times 10^{-9}$ Дж/см² (б–д); $E = 1,3 \times 10^{-3}$ Дж/см² (е–и). Развертка 50 мкс/дел. Задержка запуска осциллографа относительно начала засветки: 0,03 с (б); 0,07 с (в); 0,1 с (г); 0,75 с (д); 0,085 с (е); 0,14 с (ж); 0,6 с (з); 0,9 с (и).

щается к исходному к моменту считывания второго после засветки кадра: через 0,066 с (рис. 4в). При $E = (10^{-7} - 1,3 \times 10^{-3})$ Дж/см² уровень фона достигает исходного только после считывания двух кадров: через 0,14 с после начала засветки (рис. 4ж).

Во второй фазе реакции ПЗС-матрицы на импульсную засветку происходит медленное восстановление чувствительности и разрешающей способности при минимальном уровне фона. Процесс восстановления на этой стадии количественно и качественно зависит от энергии облучения. При малых энергиях облучения $E = 5 \times 10^{-9}$ Дж/см² матрица сохраняет исходную чувствительность и разрешающую способность при высоком уровне фона. После восстановления уровня фона до исходного чувствительность матрицы уменьшается, достигая минимума к моменту времени $t \approx 0,1$ с,

отметки от тест-объекта перестают разрешаться (рис. 4г). Затем начинается процесс восстановления чувствительности и разрешающей способности, который завершается к моменту времени $t \approx 0,75$ с (рис. 4д).

При $E = (10^{-7} - 1,3 \times 10^{-3})$ Дж/см² процесс восстановления чувствительности и разрешающей способности после восстановления уровня фона носит монотонный характер (рис. 4ж–4и).

Относительное изменение во времени чувствительности A'/A и разрешающей способности R'/R для двух крайних из диапазона значений энергетической экспозиции показаны на рис. 5. Восстановление чувствительности и разрешающей способности ПЗС-матрицы после воздействия импульсного излучения сплошного спектра происходит за время, превышающее длительность засветки на 3 порядка.

Следует отметить, что при засветке ПЗС-матрицы солнцем через объектив телевизионной камеры с освещенностью до $1,4 \times 10^8$ лк необратимых изменений параметров матрицы не происходит, а ее чувствительность после засветки восстанавливается практически мгновенно [9].

Таким образом, проведенные исследования показали, что излучение сплошного спектра с большой долей УФ составляющей обладает более сильным разрушающим действием на кремниевые фотоприемники, чем солнечное или

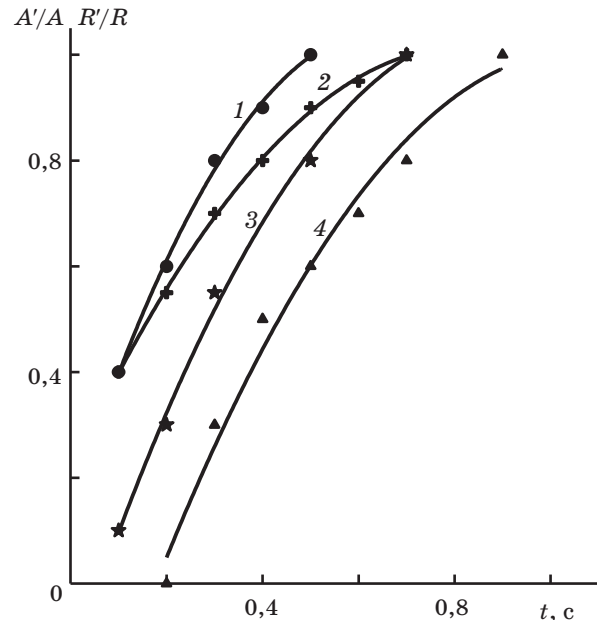


Рис. 5. Динамика восстановления чувствительности A (1–2) и разрешающей способности R (3–4) ПЗС-матрицы после импульсного облучения энергией 5×10^{-9} (1, 3) и $1,3 \times 10^{-3}$ (2, 4) Дж/см².

монохроматическое лазерное. Слабые световые потоки такого излучения способны вывести из строя кремниевые ФПУ на время, в тысячи раз превышающее длительность воздействующего импульса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Meyer J.R., Krueger M.R., Bartoli F.J. Optical Heating in Semiconductors // J. Appl. Phys. 1980. V. 51. № 1. P. 5513–5522.
2. Matsuoka Yashiharu, Urami Akara. Laser Damage of silicon // Opto-Electronics. 1974. V. 6. № 3. P. 217–223.
3. Тельный А.А. Имитация солнечного излучения в лабораторных условиях // ОМП. 1975. № 5. С. 43–47.
4. Рымов А.И., Семенов Ю.С. Малогабаритный имитатор солнечного излучения // Светотехника. 2000. № 3. С. 6–8.
5. Калашиников В.Е., Миронов И.С., Павлова Л.И., Подмошенский И.В., Роговцев П.Н. Исследование динамики излучения сильнотоочного магнитоприжатого разряда // ТВТ. 1986. Т. 5. № 5. С. 837–843.
6. Глебов Л.Б., Толстой М.Н. Образование нестабильных центров окраски в силикатном стекле при УФ облучении // Физика и химия стекла. 1976. Т. 2. № 4. С. 346–351.
7. Миронов И.С., Роговцев П.Н., Семенов С.И. Исследование характеристик кремниевых фотодиодов при импульсном облучении // Оптический журнал. 1992. № 8. С. 67–69.
8. Трищенко М.А. Фотоприемные устройства и ПЗС. Обнаружение слабых оптических сигналов. М.: Радио и связь, 1992. 400 с.
9. Гридин А.С., Салин В.И., Суцев Г.А. и др. Солнечные испытания телевизионной камеры с ПЗС-матрицей // Техника средств связи. Сер. Техника телевидения. 1983. В. 2. С. 28–31.