

УДК 535.8:666.189.2

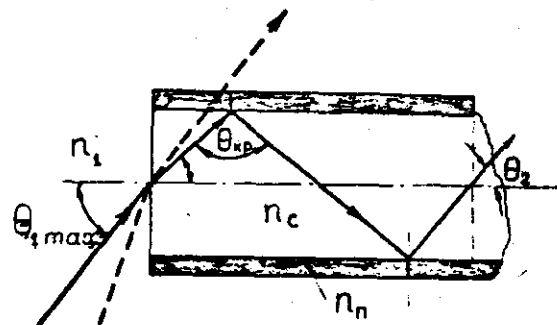
ПРИМЕНЕНИЕ ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ В ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ЦЕПЯХ

Х.И. Гаприндашвили, С.В. Свечников

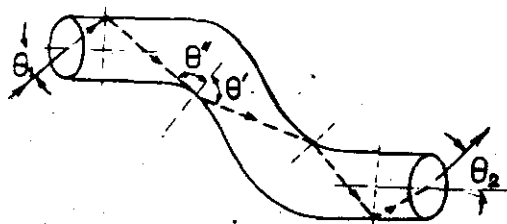
Волоконная оптика представляет собой широкий класс явлений, обусловленных прохождением света через оптически прозрачное волокно в результате многократного полного внутреннего отражения от границы раздела двух сред, различающихся коэффициентами преломления. В отличие от геометрической линзовой оптики, в которой оптическая среда преобразует изображение, в волоконной оптике оптическая среда участвует лишь в его переносе, представляя собой волновод (оптическую линию передачи), входное и выходное сечения которого линейно связаны с изменением масштаба передаваемого изображения. Это одно из основных свойств волоконной оптики, широко реализуемое в цепях функциональной электроники.

Сказанное поясняется рис. 1, на котором схематически показано прохождение света через цилиндрическое (а), изогнутое (б) и конические волокна, представляющие собой основные структурные элементы волоконной оптики. Вне зависимости от формы световод состоит из сердечника и отражающего покрытия, коэффициент преломления которого n_2 меньше коэффициента преломления сердечника.

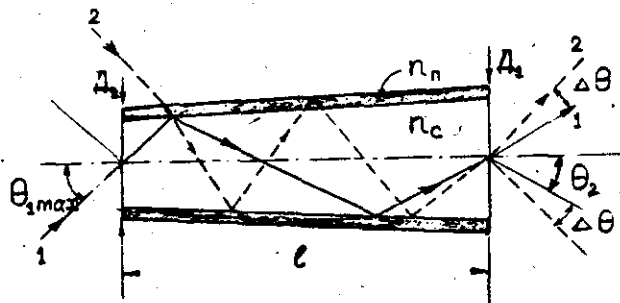
Входная и выходная угловые апертуры световода зависят от



а)



б)



в)

Рис. I. Прохождение света через стекловолокно различной формы: а - цилиндрической; б - изогнутой; в - конической.

коэффициентов преломления сердечника, покрытия и сред, из которых свет входит в световод (n_1) и в которую он выходит (n_2), а также от соотношения входного и выходного сечений волокна. Для цилиндрического волокна в соответствии с обозначениями рис. I для меридиального луча

$$\theta_{1max} = \sin^{-1} \frac{\sqrt{n_c^2 - n_n^2}}{n_1}, \quad (I)$$

а выходная апертура равна входной.

Соотношение (I) в первом приближении оказывается справедливым и для изогнутого волокна при углах изгиба до 90° , если радиус изгиба превышает некоторое критическое значение. Для изогнутого волокна выходная апертура не равна входной из-за влияния косых лучей, обусловленных изменением вдоль световода направления и высоты падения лучей вследствие переменного отношения диаметра волокна к длине его участка и радиуса изгиба к диаметру волокна.

В каноническом волокне входная угловая апертура зависит от того, рассматривается ли рассеивающий или фокусирующий световод. Для рассеивающего световода остается справедливо соотношение (I). Для фокусирующего световода угол падения луча по мере его распространения по волокну возрастает до критического, что делает зависимой входную апертуру от отношения диаметров входного и выходного сечений:

$$\theta_{1max} = \sin^{-1} \frac{D_2}{D_1} \frac{\sqrt{n_c^2 - n_n^2}}{n_1}. \quad (2)$$

От диаметров D_2 , D_1 зависит отношение

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{D_2}{D_1}, \quad (3)$$

где θ_1 , θ_2 - угол входа и выхода луча конического световода, соответственно. Для рассеивающего волокна $Q_2 < Q_1$, и световод ведет себя, как коллимирующее устройство; для фокусирующего, наоборот, $Q_2 > Q_1$, и выходной луч оказывается несколько деколлимирован.

Приведенные выше соотношения являются основными при разработке стекловолоконных устройств и систем. Они справедливы не только по отношению к отдельному волокну, но и в определенной мере и по отношению к многоэлементным стекловолоконным системам, насчитывающим 10^5 - 10^8 отдельных световодов. При этом важ-

ной характеристикой оптических линий передачи в отличие от линзовой оптики является большая их светосила, определяемая числовой апертурой, близкой к единице. Для коэффициентов преломления сердечника и покрытия, равных соответственно 1,85 и 1,48, она составляет 1,1, что определяет $\theta_{1max} > 90^\circ$. Это в 6-8 раз превышает числовую апертуру линзовой оптики ($\theta_{1max} < 11-15^\circ$).

Материалами для световодов служат различные стекла: неорганические и органические, некоторые характеристики которых приведены в табл. 1.

Стекланные световоды могут быть изготовлены практически любой длины и различных сечений, минимальные размеры которых составляют доли мкм. Максимальная длина световода ограничена ослаблением светового потока в нем, которое в первом приближении соответствует экспоненциальному затуханию

$$B_x = B_0 e^{-\kappa \ell_3}, \quad (4)$$

где B_0 , B_x - интенсивности излучения на входе световода и в точке, удаленной от него на расстояние x , соответственно; κ - коэффициент линейного ослабления; ℓ_3 - эффективная длина пути луча, зависящая от угла падения, длины волны, показателя преломления и формы волокна. При этом пропускание стекловолокна оценивается отношением

$$\chi(\theta) = \frac{B_x}{B_0} = e^{-\kappa \ell_3(\theta)} \quad (5)$$

Если к тому же $\kappa \ell_3 \ll 1$, то в первом приближении

$$\chi(\theta)_{\lambda, n_0, n} \approx 1 - \kappa \ell_3(\theta),$$

где $\kappa \ell_3$ - оптическая плотность.

Коэффициент κ определяется суммой коэффициентов поглощения и рассеивания. В области прозрачности стекол (0,4-0,9 мкм) коэффициент поглощения порядка $10^{-4}-10^{-5} \text{ см}^{-1}$. Основное же ослабление обусловлено рассеиванием излучения вдоль световода, вызванное неравномерным микрорельефом его поверхности, ее загрязнением, наличием дефектов структуры сердечника и покрытия. Эта составляющая коэффициента ослабления сильно зависит от диаметра и кривизны изгиба световода, материала и толщины покрытия и может изменяться в широких пределах (несколько порядков). Учет

Таблица 1

Некоторые характеристики неорганических стекол для оптических волоконных элементов

№ п/п	Марки стекол	Коэффициент преломления		Температура размягчения		КТР $\times 10^{-7}$		Пропускание световода на 1 м длины, %
		сердцев.	оболоч.	сердцев.	оболоч.	сердцев.	оболоч.	
1.	БФ-25	К-17	1,61	1,51	640°	79	76	97
2.	ТФ-5	БЖ-1	1,75	1,51	470°	82	90	96,5
3.	ТЖ-16	ЛЖ-6	1,61	1,47	690°	72	83	-
4.	БЖ-10	ЛЖ-6	1,57	1,47	650°	74	83	95,8
5.	Л-23	ЛЖ-6	1,62	1,47	570°	82,4	83	60
6.	Л-21-1	ЛЖ-6	1,50	1,47	610°	91,5	83	95

влияния на коэффициент рассеивания перечисленных выше факторов практически невозможен, что определяет κ как эмпирический параметр, табл. I. При этом в пределах точности 10–20% можно принять $\kappa \ell \approx \kappa \ell$, где ℓ – фактическая длина световода.

Соотношения (5) и (6) не учитывают потери излучения, обусловленные френелевским отражением излучения от входной и выходной поверхностей световода. Они пропорциональны

$$\left(\frac{n_1 - n_n}{n_1 + n_n} \right)^2$$

и зависят еще от формы волокна (цилиндрическое, коническое и пр.) и угла падения световых лучей [1]. Для стекол, приведенных в табл. I, френелевские потери составляют для $\theta \leq 30^\circ + 40^\circ$ 20%. Нижняя цифра соответствует малым $(n_1 - n_n)$ и θ . Эти потери могут быть уменьшены, если на световоде применяется просветляющее покрытие с коэффициентом преломления

$$n_3 \approx (n_1 n_n)^{1/2} \quad (6)$$

При этом френелевские потери снижаются в

$$\frac{[(n_1 - n_n)(n_1 + n_3)(n_n + n_3)]^2}{(n_1 + n_n)^2 \{ [(n_1 - n_3)(n_n + n_3)]^2 + [(n_3 - n_n)(n_1 + n_3)]^2 \}}$$

раз.

В функциональных электронных цепях, в которых используются световоды, френелевские потери составляют основную долю потерь, и их снижение определяет эффективность оптической связи.

При малых диаметрах световодов, когда

$$D < 2\lambda \quad \text{или} \quad D \approx \frac{\lambda}{2}, \quad (7)$$

световод проявляет селективные свойства, пропуская преимущественно коротковолновое излучение, ограниченное неравенствами (7). Это позволяет использовать световоды для дисперсии света и выделения спектрального состава информации.

Неравенства (7) сохраняют силу и для минимальной толщины покрытия, при которой еще сохраняется режим полного внутреннего отражения. При толщинах покрытия, сравнимых с длиной волны передаваемого излучения, луч не испытывает полного внутренне-

го отражения и выходит за пределы световода.

Для волокна, диаметр которого превышает рабочую длину волны света в несколько раз, достаточно покрытия толщиной $h \leq 0,5$ мкм. Если принять первое неравенство (7), то минимальный диаметр световода для излучения видимого диапазона или белого спектра $D \geq 2-3$ мкм.

Как всякая линия, световод вносит в передачу сигнала некоторое запаздывание, пропорциональное его длине ℓ . На длине 1 см запаздывание составляет для световодов из неорганического стекла по порядку величины $10^{-9}-10^{-10}$ сек, что лежит у границы быстрогодействия современных высокочастотных переключающих элементов [2].

В зависимости от состава применяемого стекла его проводимость может изменяться в пределах нескольких порядков ($10^{14} - 10^6$ ом.см). Это позволяет использовать световоды не только для передачи излучения и гальванической изоляции, но также для передачи электрических сигналов в слаботочных цепях. В тех случаях, когда гальваническая связь должна быть низкоомной, поверхность световода может быть металлизирована. Такой световод осуществляет как оптический, так и электрический контакты, что расширяет области применения волоконной оптики в функциональных электронных цепях.

Форма сечения световода может быть принципиально любой: круглой, овальной, квадратной, полый и пр. В последнем случае световод может быть использован также для передачи гидропонных сигналов.

На основе элементарных световодов могут быть созданы световолоконные системы, к которым относятся световолоконные катушки для передачи света и изображения, плоские и объемные фокусники, волоконные планшайбы и призмы, преобразователи координат, различные разветвляющие, размножающие устройства, что составляет арсенал технических средств волоконной оптики.

Используя перечисленные свойства световодов, волоконная оптика решает многие задачи геометрического и пространственного преобразования сигналов, что находит широкое применение в оптоэлектронике.

Т а б л и ц а 2

Сравнительные характеристики гальванической и оптической связи в функциональных электронных цепях

№ п	Фактор	Характеристика связи	
		гальванической	оптической
1.	Носитель информации	свободные заряды	электрически нейтральные фотоны
2.	Управляющая среда	электрические, магнитные поля	электрические и магнитные поля, оптические управляющие среды.
3.	Шкала электромагнитных колебаний	одномерные волны $10^8 + 10^9$ гц	двумерные волны $10^{13} + 10^{15}$ гц
4.	Направленность	0	I
5.	Взаимодействие в канале связи	сильное, кулоновское	отсутствует
6.	Развязка	плохая, ограниченная взаимодействием электрических и магнитных полей	идеальная
7.	Помехозащищенность	низкая	высокая
8.	Канализация информации	через токоведущие проводники (резистивные, емкостные индуктивные цепи)	через любые оптические среды: вакуум, воздух, световоды (безындуктивные, безъемкостные цепи)
9.	Соединения	жесткий электрический контакт	оптический контакт возможен без механической жесткой связи
10.	Многоканальность	ограниченная	большая
11.	Избирательность	ограничена добротностью контуров	ограничена шириной спектральных линий ($10^{-7} + 10^{-8}$ см).
12.	Широкополосность	$0 + 10^9$ гц	$0 + 10^{10}$ гц
13.	Отношение сигнала к шуму	ограничено джонсоновским шумом канала связи	ограничено флуктуациями светового потока
14.	Способность к перегрузкам	ограничена мощностью рассеивания проводников	не ограничена

15.	Мощность рассеивания в канале связи	ограничена конечным сопротивлением гальванической металлементной связи	практически отсутствует для оптически прозрачных сред
16.	Структурная надежность	средняя, нарушение топологических связей, выход из строя узлов и блоков схемы	высокая, ограниченная выходом из строя элементов без нарушения топологии схемы
17.	Схемотехническая гибкость	средняя, ограничена жесткими гальваническими и магнитными связями	высокая, обусловленная гибкими оптическими связями
18.	Функциональная ограниченность	существенная, ограничена транзисторной, диодной и пр. логикой, положенными в основу схемного решения	несущественная, ограничена лишь принципом фотоэлектрического преобразования
19.	Степень микроминиатюризации	высокая	высокая

По определению, оптоэлектроника представляет собой новый класс функциональных электронных цепей, в тракте передачи сигнала которых имеется оптическое звено. В цепях оптоэлектроники реализуется один из принципов преобразования: а) электрический сигнал - оптический сигнал - электрический сигнал; б) оптический сигнал - электрический сигнал - оптический сигнал.

Первый принцип лежит в основе оптоэлектронных преобразователей электрических сигналов - аналогов усилительных, генераторных, триггерных и прочих цепей, второй - в основе твердотельных преобразователей, усилителей излучения и изображения, для которых не всегда могут быть найдены непосредственные аналоги электродуговой электровакуумной техники среди ЭОПов, видеоконков, кинескопов, потенциалоскопов и пр.

Вне зависимости от реализуемого принципа преобразования, характерным признаком цепей оптоэлектроники является наличие канала оптической связи, осуществляемого через посредство той или другой оптической среды. С его характеристиками в значительной мере связана возможность реализации в оптоэлектронике основных преимуществ оптической связи, табл. 2 [3].

Структурными элементами цепей оптоэлектроники являются элементарные оптроны [3], с которых целесообразно начать иллюстрацию возможностей волоконной оптики в простейших функциональных цепях.

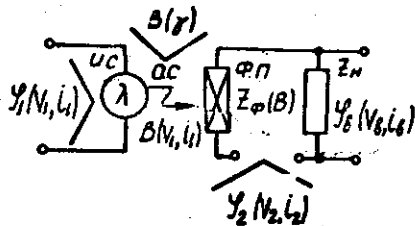


Рис. 2. Функциональная схема оптрона с прямой оптической связью

Основным уравнением оптрона (рис.2) является

$$\varphi_2(V_2, I_2) = C(\kappa_\lambda, \kappa_\varphi) B(x) \varphi_1(V_1, I_1) \varphi_2(V_2, I_2) \quad (8)$$

где κ_λ , κ_φ - коэффициенты передачи источника света и фотоприемника, соответственно; γ - фактор управления по оптической среде.

Можно показать в соответствии с (8), что при определенных значениях и видах функций $B(\gamma)$, $\varphi_1(V_1, I_1)$, $\varphi_2(V_2, I_2)$ в оптроне по схеме рис. 2 возможно выполнение операций согласования, переключения, усиления, суммирования, умножения, дифференцирования, интегрирования и пр. Это определяет рассматриваемый оптрон как универсальный элемент электрической цепи.

При заданной функциональной схеме оптрона, его коэффициент передачи и выходная мощность при прочих равных условиях определяются функцией $B(\gamma)$, являющейся характеристикой оптической среды.

Минимальные габариты и мощность управления, высокие надежность, срок службы и быстродействие оптрона реализуются при использовании в нем светодиодов GaP , $GaAs$, SiC и др., которые являются точечными источниками света. Выходная мощность оптрона ограничена размерами фотоприемников в пределах углов диаграммы направленности источника света. Согласование фотоприемников различной площади с точечным источником света при минимальных размерах оптрона возможно посредством фокона, как

На рис. 2 приведена функциональная схема оптрона, структура которого определяется оптронной парой, состоящей из управляемого источника света (λ) и фотоприемника (Ф.П.), связь между которыми осуществляется через оптическую среду (О.С.).

показано на рис. 3. При этом удается согласовать точечный источник света с фотоприемниками по шкале их мощности в пределах допустимых размеров оптронов. Это особенно существенно для аналоговых и ключевых оптронов, выполненных на фотрезисторах и фототиристорах [3]. Такой фокус может выполнять (одновременно) функции размножителя оптических каналов, рис. 3,б. В сложных схемах преобразователей УПТ [4], многоканальных коммутаторах с большим числом секций такое решение исключает нежелательные фазовые сдвиги, дает компактные решения схем управления источником света в оптроне и высокую степень упаковки коммутирующих фотоприемников, ограниченную в пределах разрешающей способности волоконной оптики (10-40 мкм/мм). В обоих случаях минимальная длина фокона $\ell_{min} = f \left(\frac{D_1}{D_2} \right)$ ограничивается неравенством

$$\ell_{min} \geq \frac{D_2 - D_1}{2 \tan \alpha} = \frac{D_1}{2 \tan \alpha} \left(\frac{D_2}{D_1} - 1 \right) \quad (9)$$

где α - угол, определяющий конусность фокона,

$$\tan \alpha = \frac{D_2 - D_1}{2\ell}$$

Длина фокона ℓ для $\frac{D_2}{D_1} \gg 1$, когда его применение целесообразно, по условию максимального коэффициента передачи не может быть сделана меньше 4-5 мм. При этом проходная емкость оптрона снижается до $10^{-4} + 10^{-5}$ пФ, а сопротивление утечки вход-выход возрастает до 10^{18} ом, что существенно для развязывания импульсных цепей. Если в оптроне по отношению к фокону поменять местами фотоприемник и источник света, рис. 3,в, то такой оптрон с практически точечным фотоприемником будет осуществлять операции сложения. В пределах линейного участка линейной характеристикой фотоприемника будет:

$$I_{\varphi} = \sum_{i=1}^{i=n} B_i$$

где B_i - яркость свечения i -го источника света, на котором осуществляется i -й электрический вход оптрона; I_{φ} - фототок в цепи фотоприемника.

Применение стекловолновой связи в оптронах позволяет использовать их для измерения ускорений и вибраций. Принцип иллюстрируется рис. 4.

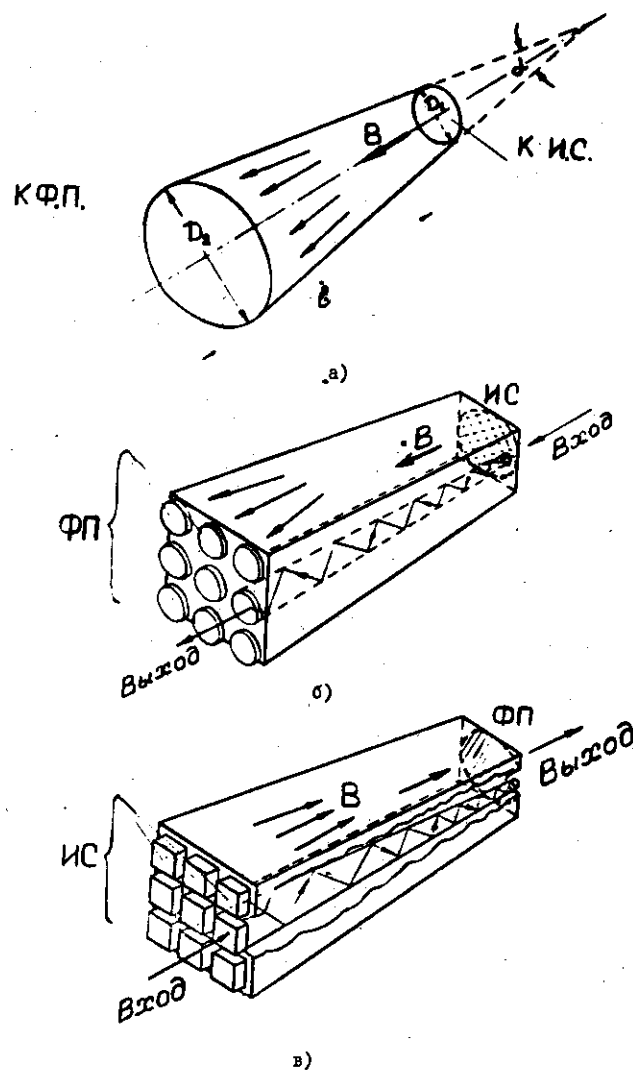


Рис. 3. Применение фононов в оптронах; а) - согласование габаритов источников света (ИС) и фотоприемника (ФП); б) - размножение каналов; в) - суммирование сигналов.

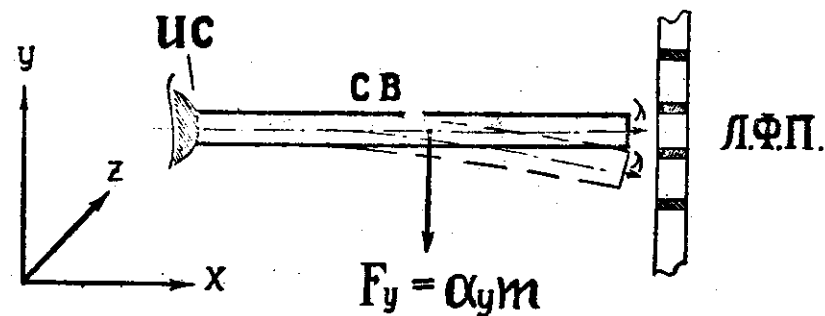


Рис. 4. Оптоэлектронный принцип измерения ускорений: СВ - световолокно; ИС - источник света; ЛФП - линейка фотоприемников с дискретным выходом.

Стекловолоконный стержень (СВ) соответствующего диаметра и длины представляет собой в таком оптроне закрепленную на источнике света консоль, свободный конец которой может перемещаться вдоль линейки фотоприемников (ЛФП). При заданной массе стекловолоконного стержня m в пределах малых отклонений перемещение его свободного конца Δy будет пропорциональным ускорению α_y . Минимальный шаг линейки фотоприемников сегодня ограничен $10 + 40$ мкм в случае фоторезисторов. Это ограничивает чувствительность оптрона. Однако предварительный расчет и эксперименты показывают, что, используя таким способом различные диаметры стержней стекловолокон и наполнение оптрона деионизирующей средой, можно измерять ускорения от $10^{-2} g$ до $10^2 g$. Эти пределы нестроги и, по всей вероятности, могут быть раздвинуты в ту или другую сторону. Подобный же принцип может быть использован для создания оптоэлектронных резонансных фильтров высокой добротности, рис. 5, представляющих собой оптоэлектронный аналог известных камертонных фильтров, для которых связь резонансной частоты с длиной стержня и его удельной массой m_l определяется зависимостью

$$\omega \sim \frac{1}{\ell^2 m_e^{1/2}}$$

Преимущества таких систем обусловлены их малыми габаритами, вы-

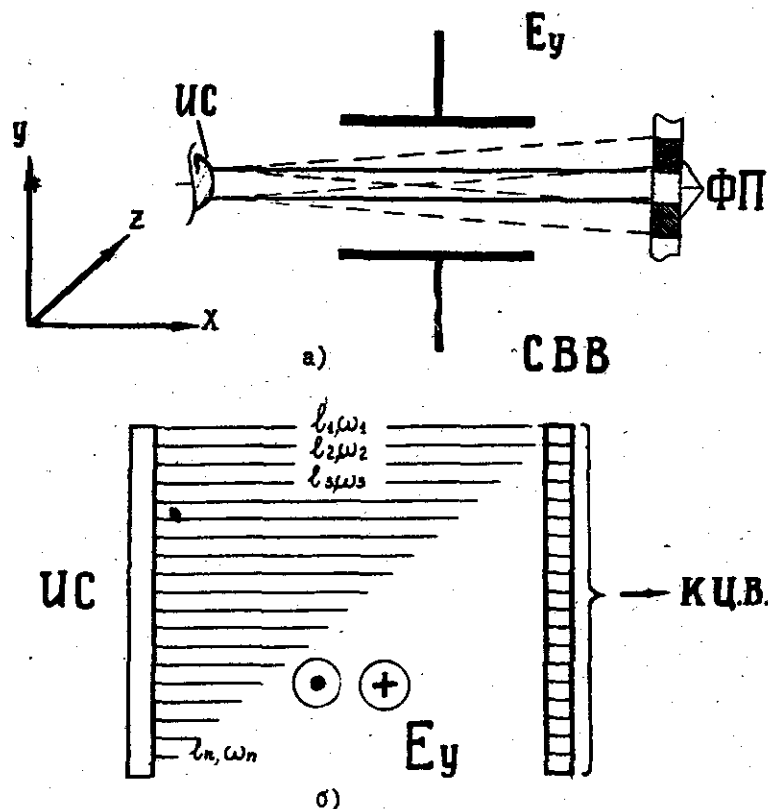


Рис. 5. Использование стекловолоконной связи в оптроне для получения характеристик резонансного фильтра: а) - принцип действия стекловолоконного вибратора; б) - принцип действия устройства фильтра; ИС - источник света; СВВ - стекловолоконный вибратор; ФП - фотоприемник с дискретным выходом; E_y - управляющее поле; ЦВ - цифровой вход.

сокой чувствительностью и добротностью, простотой преобразования механических колебаний в электрические сигналы.

Применение световодов в функциональной оптоэлектронике позволяет сравнительно просто осуществлять преобразования систем координат жесткой топологической структуры каналов оптической связи: инверсия, поворот на заданный угол, браждение, развертывание (свертывание) системы и пр. Простейшими элементами такого типа являются многокильные световоды в виде восьмерок, плоские фоконы, (рис. 6), позволяющие преобразовывать строчку в

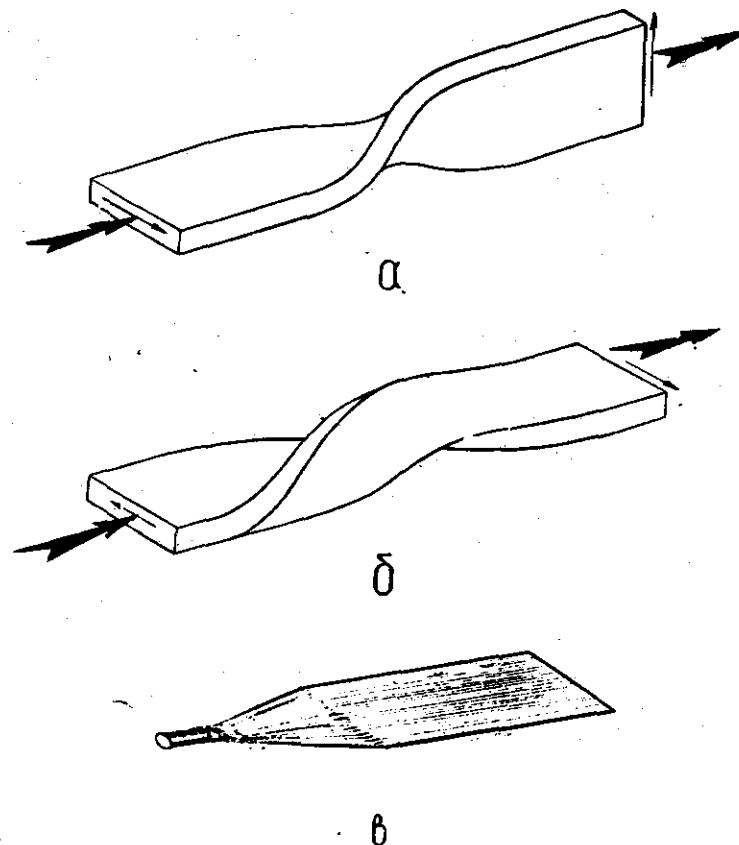


Рис. 6. Поворотные и развертывающие стекловолоконные элементы: а - полувосьмерка; б - восьмерка; в - плоский фофон.

столбец, горизонтальную строку в наклонную, инвертировать строку, разворачивать точку в строку и наоборот. Сочетая такие световоды с их механическим вращением или сканирующими источниками света, можно при точечном источнике света получить сканирующий световой пучок заданной длины, изменять порядок считывания и пр. Кроме функциональных оптоэлектронных схем, такие световоды могут найти себе применение в устройствах считывания информации с трубок и электролюминесцентных экранов, следящих устройствах, системах распознавания образов и пр.

Другая проблема в функциональной оптоэлектронике связана с созданием оптоэлектронных систем с разветвленными оптическими связями. В качестве примера на рис. 7 приведена схема оптоэлектронного кольцевого счетчика. Стрелками обозначены каналы

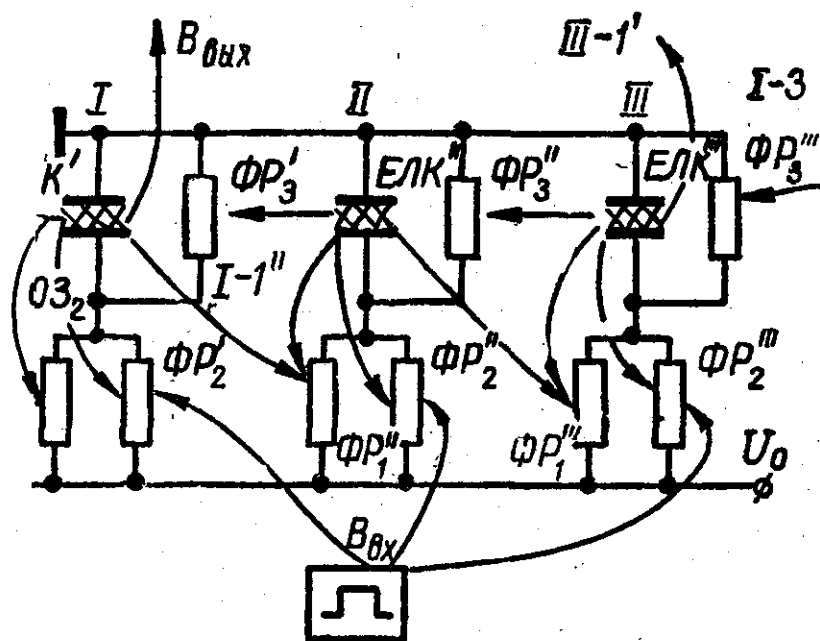


Рис. 7. Принципиальная схема узла оптоэлектронного кольцевого счетчика: ЕЛК — электролюминесцентный конденсатор; ФР — фоторезистор; стрелками показана оптическая связь.

оптической связи. Для создания таких схем требуется разработка топологии оптических цепей на базе волоконной оптики.

Арсенал технических средств волоконной оптики уже сегодня позволяет решить многие задачи сложных многоканальных связей. Наиболее типичные случаи многоканальных связей сводятся к функциям разветвления и собирания (суммирования) от одного источника ко многим пространственно разделенным фотоприемникам или, наоборот, от многих пространственно разделенных источников (или их группы) к одному фотоприемнику, на котором происходит суммирование сигналов. Такие связи выполняются посредством гибких световодов (жгутов), образующих стекловолоконные деревья, кисти и пр. (рис. 8). В зависимости от назначения отростка он может на одном из концов заканчиваться жестким стержнем, планшайбой или фокусом. Характерной особенностью таких оптических ветвей является их высокая степень многоканальности по входу или выходу, достигающая 10^2 входов на мм. Это позволяет использовать волоконные деревья в различных оптоэлектронных матрицах типа рецепторных структур в качестве "выходных рецепторов", что значительно снижает требования по разрешению к матрице фотоприемников (на два-три порядка). Тем самым существенно упрощается ее конструкция.

В качестве примера на рис. 9 приведена топологическая схема (фрагмент) оптоэлектронной модели глаза лягушки, в которой оптический вход осуществлен не на матрицу фотоприемников, разрешение которой существенно ограничено физико-технологическими ее особенностями, а на оптоэлектронную планшайбу со свободными гибкими выводами (кисти), объединяющими группы волокон. Для волокон диаметром 20–40 мкм разрешение планшайбы составляет 50–25 линий на мм, что на порядок выше разрешения фотозлектрических матриц на фоторезисторах.

Ветви осуществляют распределение светового рельефа на планшайбе по матрице фотоприемников в соответствии с заданной функцией его преобразования. Таким образом, за фотоприемниками остаются лишь функции фотозлектрического преобразования, типичного для всех цепей оптоэлектроники. Преобразуя электрический сигнал на выходе фотоприемника в световой, структуру можно повторить в соответствии с моделью глаза в целом.

Нетрудно видеть, что волоконная оптика в рассматриваемом

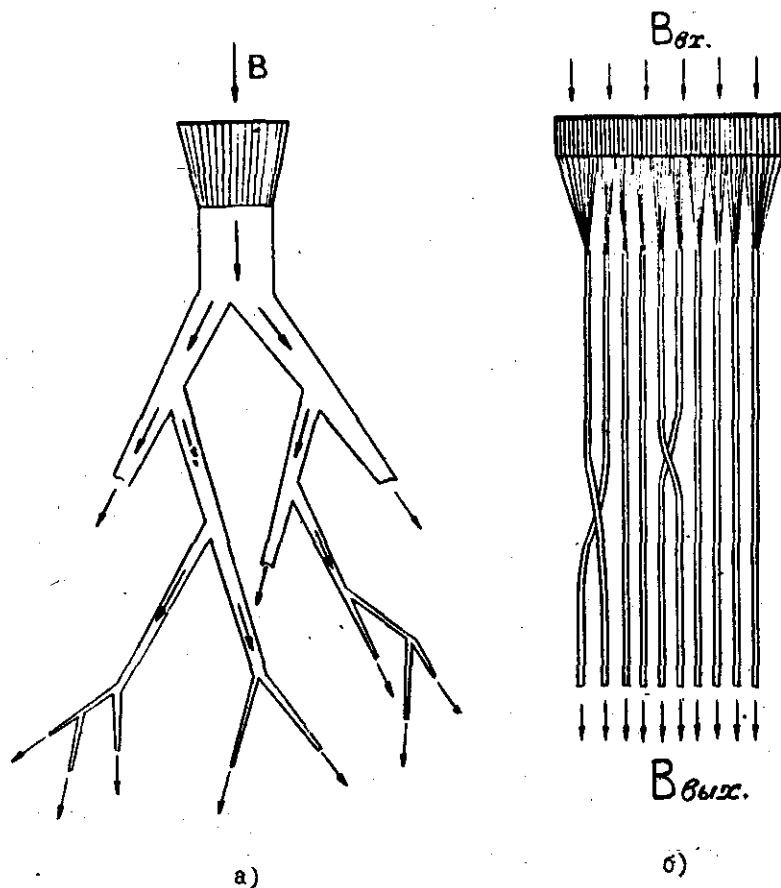


Рис. 8. Стекловолоконные системы: а) - волоконное дерево; б) - волоконная кисть.

случае дает огромные преимущества технологического и схемотехнического аспектов задачи по сравнению с электронными моделями, что вносит принципиально новое качество в ее решение.

Разветвление многоканальные оптические связи в целях функциональной оптоэлектроники можно осуществить также с использованием пленочных световодов. С применением пленочной волокон-

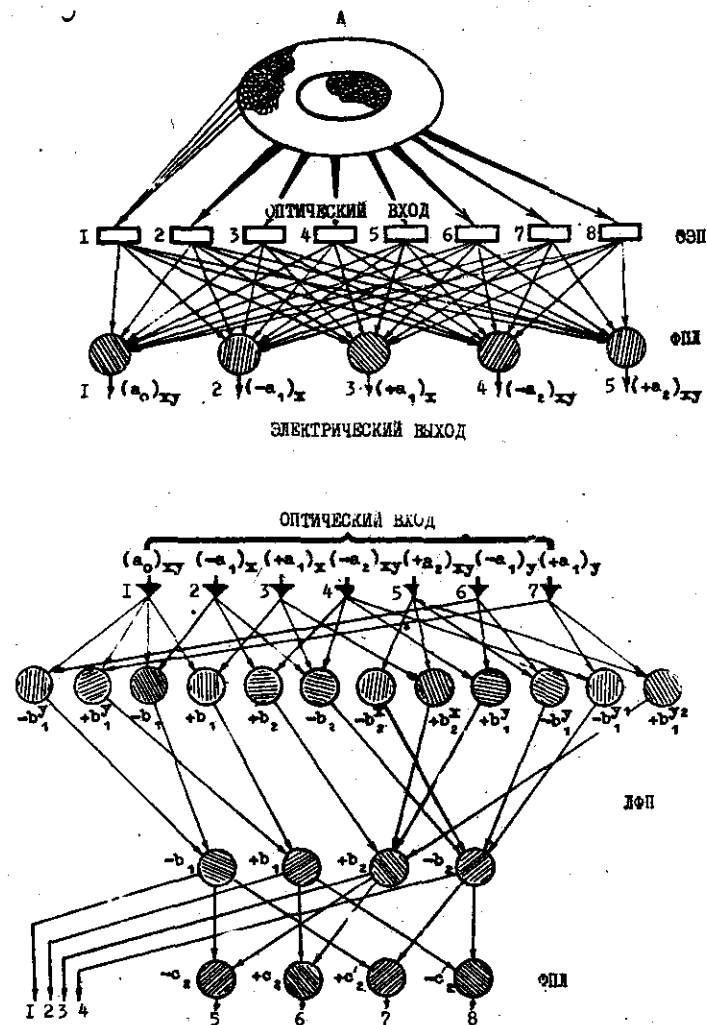


Рис. 9. Фрагмент оптоэлектронного аналога глаза лягушки: А - входная ячейка; ОЭП - оптоэлектронный преобразователь: оптический сигнал - электрический сигнал - оптический сигнал; ФП - фотоприемник логарифмический; ЛФП - линейный фотопреобразователь.

ной оптике появляется возможность выполнять оптоэлектронные схемы в виде интегральных тонкопленочных систем, в том числе и многослойных. Последнее является прямым следствием особенностей оптической связи, каналы которых не взаимодействуют между собой и служат элементами гальванической развязки между электронными узлами схемы.

Технологически эта задача проще всего решается применением органического волокна, которое допускает напыление и впаивание световедущих пленок заданных конфигурации и толщины. Упрощается и вопрос осуществления оптических контактов органического стекловолокна с источником света и фотоприемником.

Однако органическое волокно имеет ряд недостатков, ограничивающих их применение в цепях оптоэлектроники. Наиболее существенными из них являются узкий диапазон рабочих температур и сильное старение под действием ионизирующей радиации и света. Эти свойства особенно сильно проявляются в тонких пленках.

У световодов из неорганического стекла этих недостатков нет. Однако работы по пленочным световодам на их основе фактически не ведутся. В [5] было сообщено о попытке изготовить пленочный световод на основе MgO . Такой световод, рис. 10, представляет собой тонкопленочную структуру,

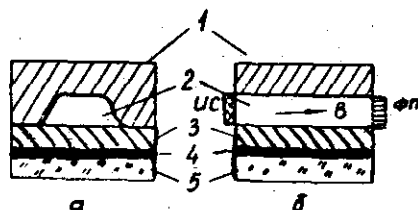


Рис. 10. Принципиальное устройство тонкопленочного световода: а) - вид с торца; б) - вид сбоку; 1, 3 - пленки SiO_2 ; 2 - пленка MgO ; 4 - алюминиевый экран; 5 - стеклянная подложка.

получаемую осаждением необходимых компонент из молекулярного пучка в вакууме. Световодом служит пленка MgO толщиной 1-4 мкм, покрытая такой же тонкой пленкой SiO_2 (отражающее покрытие). Основанием служит стеклянная подложка, покрытая непрозрачной пленкой алюминия для предотвра-

щения попадания через стекло в световод света. Последняя деталь не является принципиальной. Вместо стекла с разным успехом могут быть использованы непрозрачные материалы

радиокерамика, что исключает применение специальных оптических экранов. По данным Дойджа и Ферича [5], применение такого пленочного световода повышает эффективность оптической связи оптронной пары в 10^2 раз.

Другим примером многоканальных схем являются матричные системы, позволяющие осуществлять компактную упаковку большого числа однотипных элементов. В оптоэлектронике простейшими функциональными элементами являются оптроны, различная комбинация которых позволяет собирать схемы с заданной функцией преобразования [3]. Оptron с прямой оптической связью был рассмотрен выше. На рис. 11, а приведена другая разновидность оптрона - опtron с электрооптической связью. Его основной режим работы

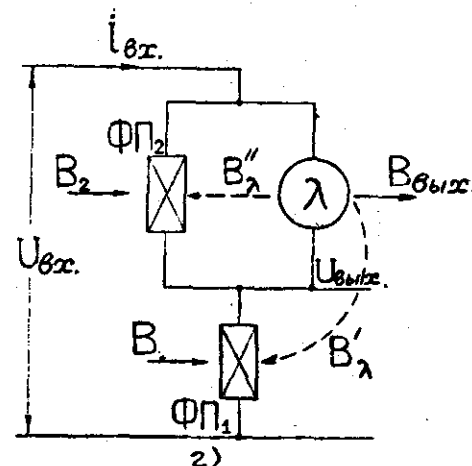
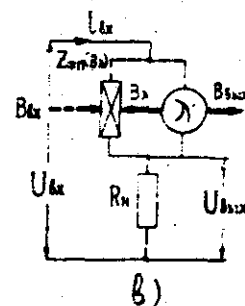
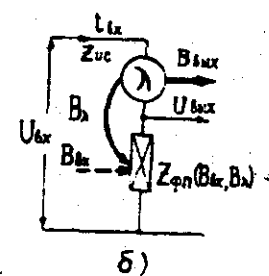
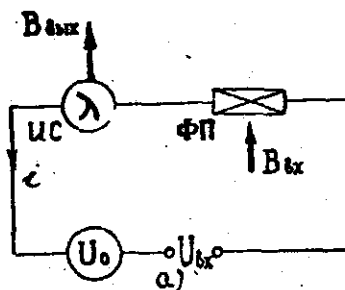


Рис. 11. Оптоны с электрооптической связью: а) - с внешней; б) - обратной положительной; в) - обратной отрицательной; г) - обратной комбинированной оптической связью.

состоит в усилении и преобразовании излучения. Он является основным структурным элементом оптоэлектронных усилителей и преобразователей излучения [6]. В оптроне по схеме рис. II, а может быть введена как положительная (рис. II, б), так и отрицательная (рис. II, в) обратные оптические связи. Если глубина положительной обратной связи такова, что

$$\beta \cdot K_B > 1,$$

где

$$K_B = \frac{B_{\text{вых}}}{B_{\text{вх}}} \frac{B_{\phi}}{B_{\text{вх}}}$$

— коэффициент усиления оптрона в режиме усилителя света;

$$B_{\phi} = B_{\text{вх}} \quad \text{при} \quad B_{\text{вх}} = 0;$$

то в вольт-амперной характеристике оптрона появляется участок отрицательного сопротивления, что превращает оптрон в бистабильный элемент, адекватный элементу памяти [7]. Если кроме внешней и положительной обратной связи в оптроне осуществлена отрицательная обратная связь (рис. II, г), то характеристические признаки такого оптрона адекватны характеристическим признакам нейрона [8]. При этом каналу прямой оптической связи на Φ_1 отвечает подача возбуждающих импульсов, а каналу прямой оптической связи на Φ_2 — запрещающих. Внутренние же оптические связи в оптроне обуславливают его характеристики как элемента асимметрической цепи.

Эффективность применения рассмотренных выше оптронов (ключевые матрицы, матрицы памяти, усилители изображения и пр.) возрастает со степенью их интеграции, что требует увеличения числа однотипных элементов и повышения степени их миниатюризации. При этом значительно возрастает степень сложности выполнения такой системы по сравнению с простым решением элементарного, единичного оптрона. В каждом оптроне, кроме внешних оптических и электрических связей, должны быть выполнены обратные оптические и прямые электрические связи при сохранении их автономности.

При создании оптоэлектронных матричных систем волоконная оптика дает пока единственно приемлемое решение, которое заключается в применении волоконных планшайб в качестве подложки, с противоположных сторон которых формируются источники света и фотоприемники.

Волоконные планшайбы представляют собой стекловолоконные жгуты большого сечения и малой длины с упорядоченным расположением волокон в общей стеклянной основе (рис. 12); каждое волокно, диаметр которого лежит в пределах от единиц до нескольких

десятиков и сотен мкм, представляет собой автономный короткий световод, обеспечивающий разрешение оптической связи на планшайбе 10–100 элементов связи на мм. Если световоду соответствует канал положительной обратной связи, то им будет в значительной мере ограничиваться дискретность системы даже в случае выполнения источников света и фотоприемников

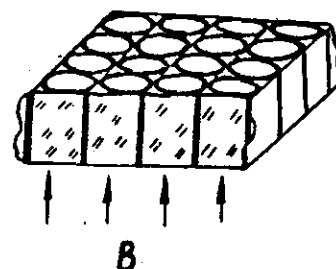


Рис. 12. Принципиальное устройство стекловолоконной планшайбы.

в виде сплошных пленок. Если линейные размеры источников света и фотоприемников порядка 50 мкм (что не является пределом), то на планшайбе 10 x 10 мм² с диаметром волокон того же порядка можно разместить около 40000 элементов памяти или ключей. Конструкция оптоэлектронной матрицы еще более упрощается, если планшайбы, кроме отражающего покрытия, будут иметь также проводящий внешний слой (рис. II), металл, проводящее стекло, что позволяет использовать стекловолокно не только для оптической, но и для гальванической связи, которые при этом остаются внутренними и формируются в одном технологическом цикле с нанесением источников света и фотоприемников оптронов.

С точки зрения функциональной оптоэлектроники применение планшайб, обеспечивающих оптическую и гальваническую связи на каждое волокно, представляется особенно перспективным в тонкопленочных матричных структурах с оптическим входом и выходом. Известные пленочные фотоприемники и электролюминофоры (материалы $\text{Al}^{III}\text{P}^{VI}$), получаемые осаждением из молекулярного пучка в вакууме, активируются при сравнительно высокой температуре (500–700°C) [9]. Это требует от планшайб жаропрочности и почти вакуумной упаковки волокон в них.

В практике разработки волоконных планшайб эти проблемы не получили пока должного решения и встречаются ряд существенных технологических трудностей. Однако перспективность таких разработок совместно с разработкой на планшайбах различных опто-электронных устройств и систем очевидна.

Настоящий доклад не претендует на исчерпывающее изложение всех вопросов применения волоконной оптики в функциональных электронных цепях. Он касается лишь общих аспектов задачи в целом, которые мы по возможности стремились проиллюстрировать некоторыми характерными примерами, которыми, естественно, не исчерпываются возможности волоконной оптики и в оптоэлектронике. Они значительно многообразнее и шире.

Проблемы применения волоконной оптики в функциональных электронных цепях еще требуют своей разработки. Однако уже сегодня очевидно, что в ряде случаев волоконная оптика позволяет найти эффективное решение многим сложным задачам функциональной схемотехники, характерным примером которых служит оптоэлектроника.

Л и т е р а т у р а

1. ЛИСИЦА М., БЕРЕЖИНСКИЙ Л., ВАЛАХ М. Волоконная оптика, Киев, "Техника", 1968.

2. NOVOTNY G.V. Fiber Optics for Electronics Engineers, Optoelectronic Devices and Circuits, Mc Graw-Hill Book Co., 1964, N 4.

3. СВЕЧНИКОВ С.В. Оптоэлектроника (на укр.яз.), Киев, "Техника", 1968.

4. БРЕЙ Т.Е. Переключение с помощью света, "Электроника", (рус.пер.), 1965, № 22.

5. ДОЙДЖ Д., ФРЕНЧ В. Осуществление связи оптоэлектронных приборов с помощью тонкопленочной передающей линии, "ТНЭЭР", (рус.пер.), 1966, т. 54, № 7.

6. СВЕЧНИКОВ С.В. Фотоэлектрические функциональные преобразователи как перспективное направление полупроводниковой электроники. - "Полупроводниковая техника и микроэлектроника", Киев, "Наукова думка", 1966.

7. АДІРОВИЧ З.И. Оптоэлектроника. - "Микроэлектроника", "Сов.радио", 1967, вып. I.

8. ГУТЧИН И.Б. Формальные нейтроны, "Знание", 1967.

9. БЬОР Р. Фотопроводимость твердых тел, М., ИЛ., 1962.