

УДК 538.56 : 530.145

Т. А. КУЛИЕВ, Е. Р. МУСТЕЛЬ, В. Н. ПАРЫГИН

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОЛУЧЕВОГО МОДУЛЯТОРА СВЕТА НА ОХЛАЖДЕННОМ КРИСТАЛЛЕ KDP

Проведено исследование пространственного электроннолучевого модулятора света, использующего электрооптический кристалл KDP при температуре, близкой к точке Кюри. Экспериментально изучены его физические характеристики. Оценена разрешающая способность.

Электроннолучевые модуляторы применяются для создания двумерного оптического изображения. Хотя исследованию электроннолучевых модуляторов посвящено несколько работ [1—3], в них содержится лишь изложение общего принципа действия устройства и конструктивного оформления модулятора. В настоящей статье изучены физические характеристики пространственного модулятора света.

Основу модулятора составляет электрооптический кристалл, на поверхности которого с помощью электронного луча записан определенный потенциальный рельеф. Запись потенциального рельефа на поверхности кристалла осуществляется за счет вторичной эмиссии.

Изменение потенциала в точке, бомбардируемой электронным лучом, связано с временем заряда t следующим соотношением:

$$t = c \int_{V_0}^V \frac{dV}{i[\sigma(V) - 1]}, \quad (1)$$

где V_0 — начальный потенциал в данной точке, c — емкость элементарного конденсатора, определяемая размером пятна и геометрией электродов, i — ток электронного луча, σ — коэффициент вторичной эмиссии, зависящей от скорости электронов у поверхности кристалла [4].

Обычно запись осуществляется в режиме, когда $\sigma > 1$. При малых $V - V_0$ зависимость $\sigma(V)$ можно считать линейной, т. е.

$$\sigma(V) = 1 + \alpha(V_p - V),$$

где V_p — равновесный потенциал, α — коэффициент пропорциональности.

В этом случае выражение (1) принимает вид:

$$V - V_0 = (V_p - V_0) \left(1 - e^{-\frac{\alpha it}{c}}\right). \quad (2)$$

При заданной емкости C разность потенциалов $V - V_0$ зависит от произведения it . Таким образом, увеличение скорости записи (уменьшение t) требует для получения той же разницы потенциалов пропорционального увеличения первичного тока i . При малом it разность потенциалов пропорциональна первичному току, при больших — происходит насыщение, связанное с возвращением вторичных электронов на кристалл. Неравновесная запись наблюдается при линейной зависимости $V - V_0$ от it . Таким образом, в этом случае $V - V_0$ мало по сравнению с $V_p - V_0$. Это приводит к необходимости использования в пространственном электроннолучевом модуляторе электрооптических кристаллов с малым полуволновым напряжением. В обычно применяемых кристаллах типа КДР полуволновое напряжение порядка нескольких кв. Однако это напряжение можно значительно понизить, охлаждая кристалл до температуры, близкой к точке Кюри [5]. Дополнительным преимуществом охлажденного устройства является то, что при работе вблизи точки Кюри увеличивается удельное сопротивление кристалла, что приводит к увеличению времени, в течение которого сохраняется записанный потенциальный рельеф [1].

Разрешающая способность электроннолучевого модулятора определяется распределением потенциала зарядного пятна по передней поверхности кристалла.

Кристалл в электроннолучевом модуляторе (рис. 1) помещен в конденсатор, образованный коллекторной сеткой (6) и сигнальной пластиной (8). Оптическая ось кристалла нормальна пластине конденсатора. На коллекторную сетку, находящуюся на расстоянии d от поверхности кристалла, подается потенциал V_k . Сигнальная пластина расположена непосредственно на поверхности кристалла и имеет потенциал V_c . Кристалл анизотропен и характеризуется двумя коэффициентами диэлектрической проницаемости ϵ_{\parallel} и ϵ_{\perp} .

В отсутствие свободного заряда на поверхности кристалла устанавливается потенциал

$$V_0 = \frac{(V_k - V_c)l}{\epsilon_{\parallel}d + l} + V_c. \quad (3)$$

При электронной бомбардировке потенциал поверхности может увеличиться не более чем до величины V_k . Поэтому глубина записанного на поверхности кристалла потенциального рельефа равна

$$(V - V_0)_{\text{макс}} = V_k - V_0 = (V_k - V_c) \frac{\epsilon_{\parallel}d}{\epsilon_{\parallel}d + l}.$$

При $\epsilon_{\parallel}d \ll l$, $(V - V_0)_{\text{макс}} \ll V_k - V_c$ и глубина записанного рельефа очень мала. Для того чтобы $(V - V_0)_{\text{макс}}$ было бы больше $\frac{V_k - V_c}{2}$, необходимо выполнение условия

$$d \geq \frac{l}{\epsilon_{\parallel}}. \quad (4)$$

Рассмотрим потенциал V в центре равномерно заряженного пятна радиуса r , находящегося на поверхности кристалла. Плотность заряда равна ρ . Если расстояние от коллектора до кристалла велико по сравнению с толщиной кристалла, т. е. $l \sqrt{\frac{\epsilon_{\perp}}{\epsilon_{\parallel}}} \ll d$, то потенциал V имеет вид

$$V = V_0 + \frac{4\pi\rho}{1 + \sqrt{\epsilon_{\parallel}^2 + \epsilon_{\perp}}} \left[r - \sqrt{r^2 + 4l^2 \frac{\epsilon_{\perp}^2}{\epsilon_{\parallel}^2}} + 2l \sqrt{\frac{\epsilon_{\perp}}{\epsilon_{\parallel}}} \right].$$

В этом случае потенциал в центре пятна зависит от размеров пятна. Поэтому совокупность соседних зарядных пятен также будет влиять на потенциал в центре данного пятна. Элементы разрешаются только тогда, когда их радиус r велик по сравнению с величиной $l\sqrt{\frac{\epsilon_{\perp}}{\epsilon_{\parallel}}}$. Это накладывает жесткие ограничения на толщину кристалла.

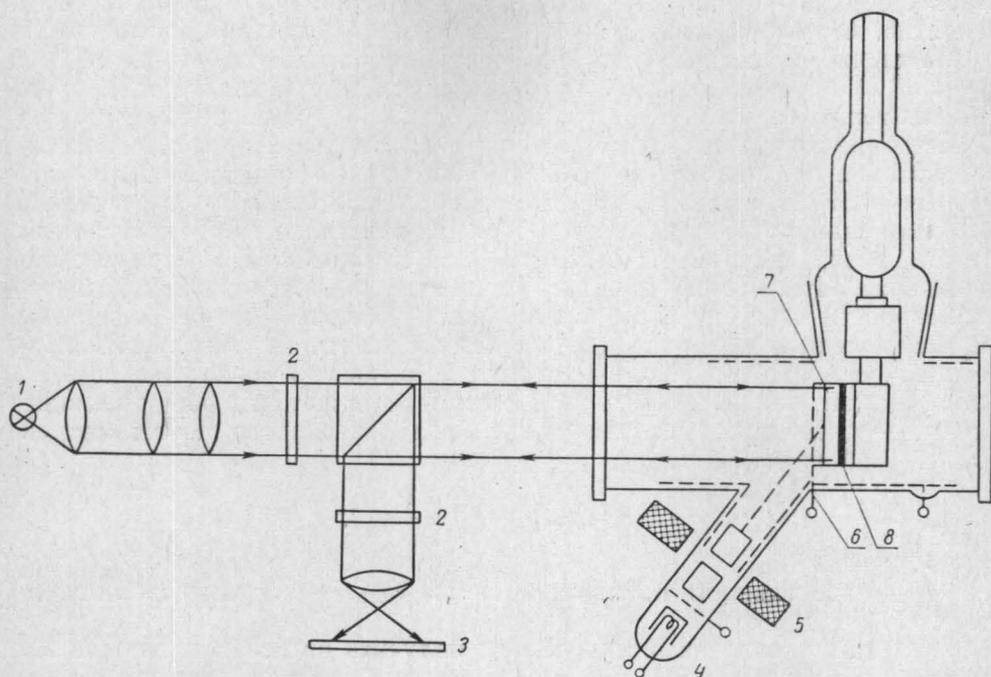


Рис. 1. Принципиальная схема устройства: 1 — источник света, 2 — поляриды, 3 — экран, 4 — электронная пушка, 5 — отклоняющая система, 6 — коллекторная сетка, 7 — кристалл, 8 — сигнальная пластина

Если толщина кристалла велика по сравнению с расстоянием до коллектора, т. е. $l\sqrt{\frac{\epsilon_{\perp}}{\epsilon_{\parallel}}} \gg d$ (5), то

$$V = V_0 + \frac{4\pi\rho}{1 + \sqrt{\epsilon_{\perp}\epsilon_{\parallel}}} [r - \sqrt{r^2 + 4d^2} + 2d].$$

При $r \gg 2d$ это напряжение принимает вид

$$V = V_0 + \frac{8\pi\rho d\epsilon_{\perp}}{1 + \sqrt{\epsilon_{\perp}\epsilon_{\parallel}}} \left(1 - \frac{d}{r}\right).$$

В этом случае толщина кристалла не влияет на разрешение системы.

Таким образом, для получения максимального разрешения необходимо уменьшать расстояние от коллекторной сетки до кристалла. Предел уменьшению d кладет период коллекторной сетки. Одновременное выполнение условий (4) и (5) возможно при $\epsilon_{\parallel}^2 > \epsilon_{\perp}$. В охлажденном до температуры близкой к точке Кюри кристалле последнее условие хорошо выполняется.

Экспериментальная часть

Экспериментальный макет охлаждаемого электроннолучевого модулятора изображен на рис. 1. В качестве источника света служила лампа накаливания. Модулирующим кристаллом являлся кристалл KDP (7) Z-среза размерами $10 \cdot 10 \cdot 1$ мм³. Для уменьшения в два раза полуволнового напряжения свет пропусклся через кристалл дважды. Для этого на заднюю поверхность кристалла наносилось металлическое зеркальное покрытие (8), которое отражало падающий свет обратно. Одновременно это покрытие служило сигнальной пластиной. Охлаждение кристалла до температуры близкой к точке Кюри (-151°C) осуществлялось жидким азотом через медный хладопровод. Коллектором служила металлическая сетка (6) с периодом 100 мк. Расстояние между сеткой и кристаллом фиксировалось слюдяной кольцеобразной прокладкой (~ 100 мк). Электронная пушка (4) позволяла формировать луч диаметром около 1 мм. На коллектор относительно катода подавалось напряжение 1700 в. На кристалле KDP электронным лучом, разворачиваемым по поверхности, записывалось постоянное напряжение. При записи использовалась однократная линейная развертка, скорость которой можно было плавно изменять. Свет через систему при скрещенных поляроидах и отсутствии заряда на поверхности кристалла не проходил. После однократной развертки на экране появлялась светлая линия. Яркость этой линии зависит от разности потенциалов $V_k - V_c$ между заряженной линией на поверхности кристалла и сигнальной пластиной:

$$I = I_0 \sin^2 \left[\frac{\pi (V - V_c)}{2V_{\lambda/2}} \right], \quad (6)$$

где I_0 — интенсивность падающего света, $V_{\lambda/2}$ — полуволновое напряжение.

Смещая электронный луч, можно получить ряд светлых линий. На кристалле площадью $8 \cdot 8$ мм² можно было записать до 8 четко различимых линий. Эта запись оставалась неизменной в течение нескольких часов.

Для исследования количественных характеристик модулятора производилось фотографирование записанных линий. Пленка фотометрировалась. В результате была исследована зависимость интенсивности проходящего света от тока первичных электронов при различных скоростях развертки.

Основные измерения были проведены на модуляторе, охлажденном до температуры, превышающей температуру Кюри на 20°C . Дальнейшее приближение к точке Кюри уменьшает полуволновое напряжение, но требует специальной системы термостабилизации кристалла. При $T - T_k = 20^\circ$ выигрыш по полуволновому напряжению по сравнению с комнатной температурой составил 9 раз. Поэтому с учетом двукратного прохождения света через кристалл $V_{\lambda/2}$ было равно 300 в. При $d = 0,1$ мм, $l = 1$ мм, $\epsilon_1 = 300$ (с учетом охлаждения) из формулы (3) следует

$$V_0 - V_c = 0,03 (V_k - V_c).$$

При использованных в данной работе напряжениях $V_k - V_c < 300$ в отличие V_0 от V_c не сказывается на интенсивности света. Поэтому при расчете зависимости I/I_0 от тока первичных электронов в выражение (6) вместо $V - V_c$ можно подставлять $V - V_0$ из соотношения (2):

$$I/I_0 = \sin^2 \left[\frac{\pi}{2V_{\lambda/2}} (V_p - V_0) \left(1 - e^{-\frac{i\alpha t}{C}} \right) \right]. \quad (7)$$

Экспериментальные зависимости удовлетворительно соответствуют соотношению (7) при

$$V_p = V_k + 8\text{ в}, \quad \frac{\alpha}{C_1} = 1,7 \cdot 10^6 \text{ в/кул},$$

где C_1 — емкость единицы длины заряженной линии.

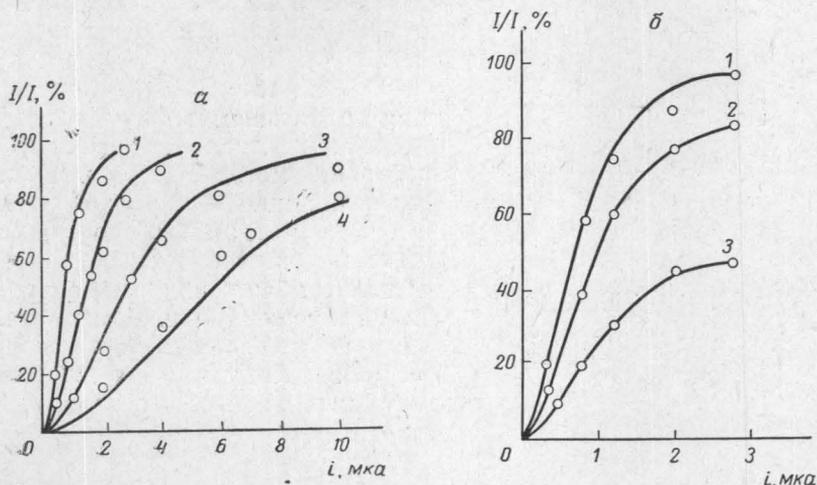


Рис. 2. Зависимость I/I_0 от тока луча. а: $V_k - V_c = 280$ в: 1 — $v_p = 1,6$; 2 — $v_p = 3$; 3 — $v_p = 6$; 4 — $v_p = 12$ м/сек; б: $v_p = 1,5$ м/сек; 1 — $V_k - V_c = 280$; 2 — $V_k - V_c = 230$; 3 — $V_k - V_c = 150$ в

На рис. 2,а приведена зависимость интенсивности прошедшего света от первичного тока при различных скоростях развертки для случая $V_k - V_c = 280$ в. Сплошные кривые рассчитаны по соотношению (7). На кривых имеется область линейной зависимости I/I_0 от тока, которая может быть использована в модуляторе при неравновесной записи. На рис. 2,б даны зависимости I/I_0 от тока при различных значениях $V_k - V_c$ для фиксированной скорости развертки. При малых $V_k - V_c$ насыщение кривых наблюдается при меньших токах, так как за время развертки потенциал V успевает приблизиться к V_p . С ростом $V_k - V_c$ увеличиваются пределы линейного изменения интенсивности света.

Была также исследована зависимость I/I_0 от тока при различных температурах кристалла. Результаты исследований приведены на рис. 3. Сплошные кривые на этом рисунке рассчитаны из соотношения (7). Чем дальше температура кристалла от точки Кюри, тем меньше интенсивность света, прошедшая через модулятор при данном $V_k - V_c$ и тем при меньших токах происходит насыщение. Так как при повышении температуры полуволновое напряжение растет пропорционально $\xi T - T_h$, а диэлектрическая проницаемость меняется пропорционально $(T - T_h)^{-1}$, то произведение it не зависит от температуры. Поэтому при малых токах кривые на рис. 3, соответствующие разным $T - T_h$, совпадают.

Таким образом, приближение к точке Кюри позволяет при данном $V_k - V_c$ увеличить пределы линейной зависимости интенсивности света от тока.

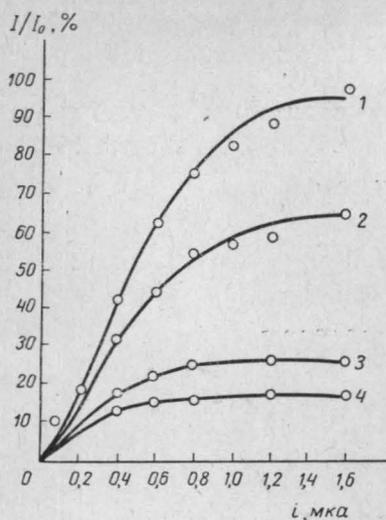


Рис. 3. Зависимость I/I_0 от тока луча при $V_k - V_c = 300$ в $v_p = 1,2$ м/сек; 1 — $T - T_k = 20$, 2 — $T - T_k = 32$, 3 — $T - T_k = 58$ и 4 — $T - T_k = 74^\circ$

Для оценки разрешающей способности и контрастности полученного изображения была исследована форма линии, т. е. распределение интенсивности света по поперечному сечению линии. Результат измерений для типичной линии по уровню $I/I_0 = 0,5$ составляет 1,3 мм; по уровню $I/I_0 = 0,1 - 2$ мм. Линия имеет колоколообразную форму, плавно переходящую в уровень фона, составляющий примерно 0,05 от интенсивности падающего света.

Полученные результаты не являются предельными для электроннолучевых модуляторов. Разрешение и контрастность могут быть повышены при использовании электронной пушки с малым диаметром луча, при оптимизации геометрии всего устройства и дальнейшем приближении температуры кристалла к точке Кюри. Дополнительные преимущества могут быть получены при работе модулятора в области максимальных для данного кристалла значений σ .

ЛИТЕРАТУРА

1. Marie G. Philips Research Report., 22, 110, 1967.
2. Радиоэлектроника за рубежом, № 44, 17, 1968.
3. Missiles, Rockets. 16, 35, 1965.
4. Кноль М., Кейзан Б. Электроннолучевые трубки с накоплением зарядов. Госэнергоиздат.
5. Сонин А. С., Василевская А. С., Струков Б. А. ФФТ, т. 8, № 11, стр. 3436, 1966.

Поступила в редакцию
3.9 1970 г.

Кафедра
физики колебаний