≪연구논문≫ Journal of The Korean Magnetics Society, Volume 10, Number 2, April 2000

컴퓨터 시뮬레이션을 통한 고 스위칭 감도를 갖는 반사형 자기 광학 공간 광 변조기의 드라이브 라인 형상 설계

박재혁 · 조재경
경상대학교 공과대학 전자재료공학과, 경남 진주시 가좌동 900

(1999년 12월 22일 받음, 2000년 3월 10일 최종수정본 받음)

자기 광학 공간 광 변조기의 화소의 자화를 반전시키기 위하여 사용하는 드라이브 라인의 형상을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 설계하고, 연자성막을 도입함으로써 화소 반전에 필요한 최소 전류와 소비 전력을 기존의 드라이브 라인에 비하여 약 3배 감소시킬 수 있었으며, 드라이브 라인을 묻지 않고, 화소를 덮는 반사막(드라이브 라인)의 면적을 크게 하여 광효율을 2.2배 증가시키고, 제조공정을 대폭 단순화시킬 수 있는 드라이브 라인의 형상을 제시했다

I. 서 론

공간 광변조기(spatial light modulator)는 빛의 진폭, 위상 혹은 편광 상태를 공간적으로 변조하는 소자이다. 1950년대의 사진 필름을 사용한 선구적인 연구를 필두로 2차원적인 화소 배열을 갖는 현대적인 공간 광 변조기는, 전자 소자들이 지니지 않는, 정보를 고속으로 병렬 처리할 수 있는 가능에 힘입어, 광상관기, 광컴퓨터, 프로젝션 TV, 빔 프로젝트, 홀로그래피 메모리의 핵심 소자로 지난 50년간 활발히 연구되어, 액정 공간 광 변조기, 자기 광학 공간 광 변조기 등이 개발되었다. 이 중에서 자기광학 공간 광 변조기는 화소의 스위칭 스피드가 빠르고, 견고하고, 내방사능성을 가질 뿐만 아니라, 비휘발성이라는 장점을 가지고 있으므로, 주로 우주항공용의 MROC(Miniature Ruggedized Optical Correlator)[1-3]에 사용되어 왔다.

자기광학 공간 광 변조기의 시초는 1970년대 초 네덜란드의 필립스사에 의해 연구가 시작된 MOPS(Magneto-optic photoconductive sandwich)라고 할 수 있다. MOPS는 디스플레이 소자 및 프린터의 헤드에의 응용을 목적으로 개발되었는데, 빛을 변조하기 위한 자기광학 재료로서는 버블 메모리에 사용되던, 철 가네트 에피탁시 막을 사용하였다. 이 가네트막 위에 포토리소그라피에 의해 바둑판 모양의 패턴을 만든 다음, 바둑판의 검은 줄에 해당하는 부분을 화학적으로 에칭하여, 사각형 가네트 섬의 2차원적인 어레이를 만들어, 이것을 디스플레이 화소로 사용했다. 정보의 기록은 전체 화소 어레이에 바이어스 자장을 건 상태에서, 특정한 화소에 레이저빔을 쪼여 가열하여 자화의 방향을 결정하는 방식을 사용하였다. 정보의 재생은, 기록시보다 약한 레이저빔을 전체 화소 어레이에 조사하여 자기 광학 효과(자화에 의해 빛이 편광면이 회전하는 효과)를 이용했다. MOPS는 화소를 열적으로 스위칭했기 때문에 스위칭 속도가 느리다는 단점을 가지고 있었고, 레이저빔을 각 화소에 쪼이기 위해 요구되는 편향각이 큰 광편향기의 부재로 실용화되지 못했다.

최초로 실용화된 자기 광학 공간 광 변조기는, 1980년대 초부터 미국의 리튼사에 의해 연구개발이 시작된 LIGHT-MOD™(Litton iron garnet H(magnetically) triggered magneto-optical device)로서, MOPS와 같이 사각형의 가네트 화소 어레이로 이루어져 있었으나, 정보의 기록은, MOPS와는 다르게 각 화소 위에 입힌 X-Y 격자 형태의 금속 박막(드라이브 라인)에 전류를 흘려 발생한 자장을 이용하여 특정한 화소에 자구를 생성시킨 후, 전체 화소 어레이에 바이어스 자장을 걸어, 그 화소의 자벽을 화소의 가장자리까지 이동시켜 화소의 스위칭을 완료하는 방식을 사용했다. 정보의 재생에는 역시 자기 광학 효과를 이용했다. 이 소자는 전기적으로 구동되므로 스위칭 속도가 빠르고 기록된 정보가 안정하다는 장점을 가지고 있었으나, 단점은 화소 스위칭 자기장을 얻기 위하여 금속 박막 드라이브 라인에 높은 전류를 흘려 줘야 한다는 것이다. 이 제1세대 자기광학 광 변조기는 투과형이었으며, 화소의 크기가 크고, 화소간의 갭에 드라이브 라인을 설치하였으므로, 갭 넓이도 넓어, 전체적인 소자의 크기가 커져서, 광 상관기를 구성시 광학계의 초점거리가 길어져, 광 상관기의 길이가 수 미터에 달했다. 또한, 광학적 성능에도 한계가 있었다. 현재 리튼사의 자회사에서 만든 화소 수 , 128 ×128(64 kbit), 화소의 크기 57 μm의 투과형 자기 광학

공간 광 변조기 소자가 극히 제한된 군사적 응용에 사용되고 있다.

2세대 자기 광학 공간 광 변조기는 1990년대 초에 미국의 카네기 멜론 대학과 리튼사가 공동으로 연구 개발한 R-MOSLM™(Reflective-Magneto Optic Spatial Light Modulator)으로써 제 1세대와는 달리, 자기광학 효과의 비가역성(막후를 반으로 줄여도 빛을 한쪽 면에서 반사시켜 막 속을 왕복시키면 동일한 크기의 자기 광학 효과가 얻어지는 성질)에 착안한 반사형이었다[4]. 이 소자는 상대적으로 얇은 가네트 막을 사용하고, 첨단 반도체 dry process를 사용함으로써, 화소의 크기를 22 μm으로, 화소간 갭을 2 μm으로 소형화하였다. 이는 제 1세대의 투과형 소자에 비해 분해능을 3배로, 광효율을 2배로 향상시켰으며, 광로장을 10배로 감소시켰다. 또한 좁은 드라이브 라인을 사용하고, 드라이브 라인의 일부를 가네트막 속에 묻는 것에 의해 화소의 스위칭 감도를 4배로 향상시켰다.

R-MOSLM에서는 화소의 자화 스위칭에 요구되는 드라이브 라인의 전류를 감소시키기 위해서 드라이브 라인의 폭을 화소 중앙에서 1.6 μm으로 좁히고(전류밀도를 높이기 위함), 화소 중앙에 홈을 파서 드라이브 라인을 묻고(자장을 효율적으로 인가하기 위함), 화소의 중앙에 B+ 이온을 임플랜트 하는(자기 이방성을 감소시키기 위함)등 (Fig. 1)의 노력을 기울이었으나, 화소 스위칭을 위한 각각의 드라이브 라인 전류는 200 mA, 100 mA정도로 높아, 자기광학 공간 광 변조기의 일반적인 최대의 단점인 화소 스위칭 감도가 낮다 – 화소의 자화를 스위칭하기 위해서 드라이브 라인에 강한 전류를 흘려야 한다 – 는 문제점을 해결하지는 못했다.

본 논문에서는 고 스위칭 감도를 갖는 자기 광학공간 광 변조기의 설계를 목적으로 드라이브 라인 전류에 따른 자기장의 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여, 드라이브 라인의 최적 형상을 설계하고, 연자성 박막에 의해 드라이브 라인의 자기장을 증대시키는 것으로, 기존의 R-MOSLM보다 화소 스위칭 감도가 3배 크고, 제조 공정이 보다 단순한 반사형 자기 광학 공간 광 변조기의 모형을 제시한다.

II. 드라이브 라인의 설계

기존의 R-MOSLM의 드라이브 라인은 Fig. 1에서 보듯이 나비 넥타이 모양과 유사한, 화소 중앙 부분으로 갈수록 폭이 좁아지는 형상을 가지고 있다. Fig. 1에 화소 한 개의 드라이브 라인과 절단면의 모식도를 나타냈다. X-Y

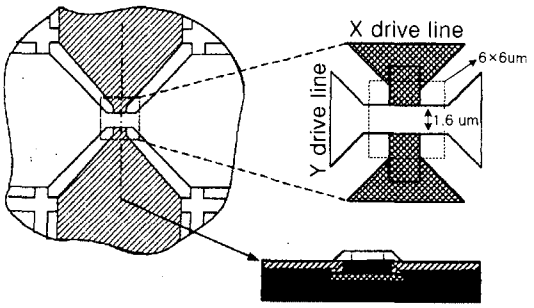


Fig. 1. Schematic of conventional drive line on a pixel.

드라이브 라인은 화소의 중앙 부분을 제외하고 자성 가네트 화소의 표면에 밀착되어 있다. Y 드라이브 라인은 화소 중앙 부분에서 홈(가로 9.6 μm, 세로 1.6 μm, 두께 0.3 μm)을 통과하도록 되어 있고, X 드라이브 라인은 화소의 중앙에서는 Y 드라이브 라인과의 절연을 위한 사각

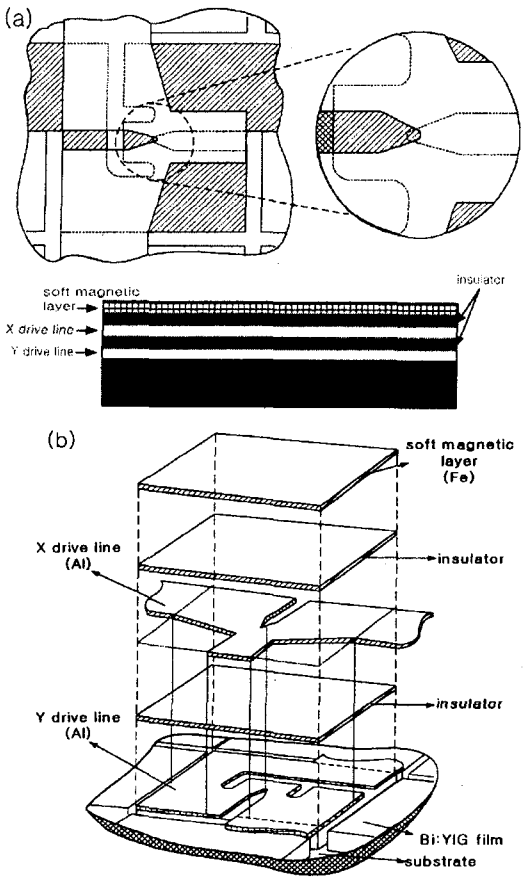


Fig. 2. Schematic of new drive line on a pixel (a)Top and cross sectional view, (b) Development view.

형의 절연체막(6×6 μm) 위를 지나가게 되어 있다. 화소의 표면에 밀착되어 있는 X-Y 드라이브 라인의 부분은 빛을 기판 쪽에서 입사할 때 반사막 역할도 한다.

Fig. 2(a)에 본 연구의 R-MOSLM에서 화소 한 개의 드라이브 라인, 쐐기 모양의 만입 부분의 확대도, 그리고 절단면의 모식도를 나타냈고, Fig. 2(b)에 전체적인 입체도를 나타냈다. 본 연구에서 고안한 드라이브 라인은 Fig. 2에서와 같이 직사각형 화소의 중앙 부분에 쐐기 모양의 만입을 가지고 있는 형태이고, Y 드라이브 라인, 절연막, X 드라이브 라인, 절연막, 연자성막이 순차적으로 화소 전체를 덮는 적층형으로 되어 있다. Y 드라이브 라인은 화소의 전체 표면과 밀착되어 있으며, 기존의 R-MOSLM과는 달리 화소의 중앙 부분에 홈이 존재하지 않는다.

III. 드라이브 라인 전류에 의한 자기장의 컴퓨터 시뮬레이션

컴퓨터 시뮬레이션은 유한 요소법에 기반한 Ansoft사의 3-D Maxwell Electromagnetic Field Simulator를 이용하여 수행했다. 드라이브 라인의 재질은 Al으로, 연자성층은 Fe로 가정하였다. Balloon boundary를 사용했고, 에너지 오차는 1.96% 였다.

Fig. 3에 기존의 R-MOSLM의 Y 드라이브 라인의 폭 1.6 μm의 좁은 부분(두께 0.2 μm)에 100 mA의 전류를 흘렸을 때, xz 평면에서 (a) z = 0.1, (b) z = 0, (c) z = –0.2

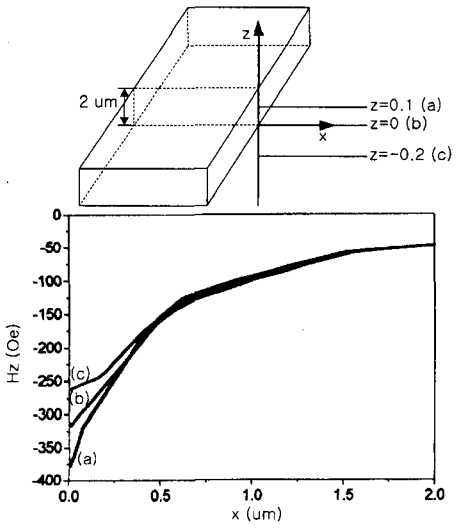


Fig. 3. Perpendicular magnetic field H_z produced by a Y drive line of conventional R-MOSLM carring 100 mA.

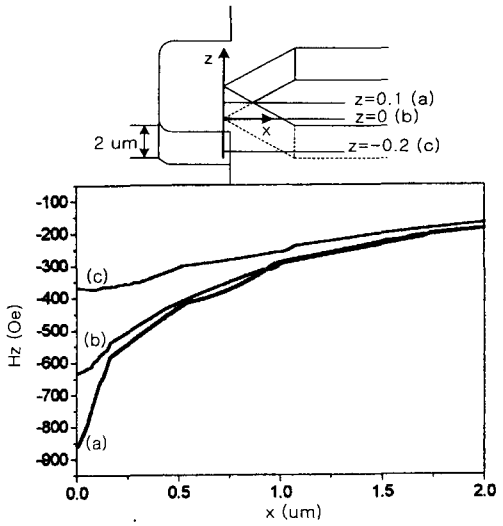
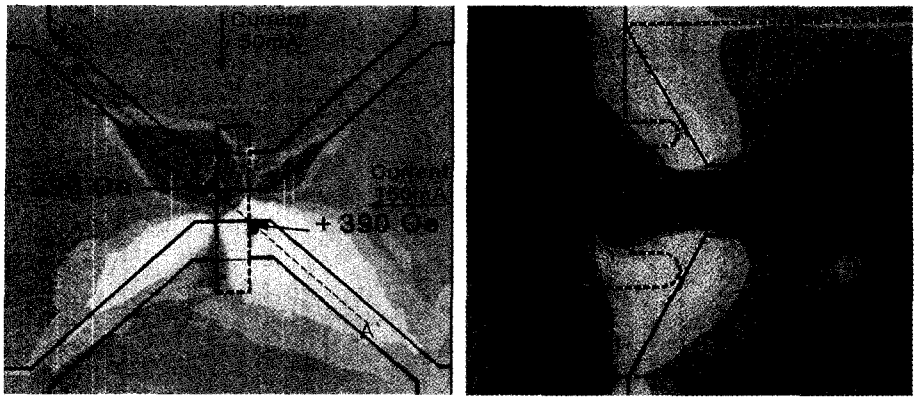


Fig. 4. Perpendicular magnetic field H_z produced by a Y drive line of new R-MOSLM carring 100 mA.

인 직선의 원점에서 x축 방향으로의 거리에 따른 수직 자기장 H_z를 나타내었다. 드리이브 라인과 멀어질수록 H_z가 급격히 감소함으로 기존의 R-MOSLM은 가장 큰 H_z를 보여주는 (a) z = 0.1인 드라이브 라인 옆면의 H_z을 이용하기 위하여, 화소에 홈을 파고 Y 드라이브 라인을 묻는 형상으로 스위칭의 효율을 극대화하고자 하였다.

Fig. 4에 본 연구의 Y 드라이브 라인의 쐐기 모양의 만입 부분에 100 mA의 전류를 흘렸을 때, xz 평면에서 (a) z = 0.1, (b) z = 0, (c) z = –0.2인 직선의 원점에서 x축 방향으로의 거리에 따른 수직 자기장 H_z를 나타내었다. z = 0.1 (Fig (a))에서의 H_z는 기존의 드라이브 라인에 비해 약 2배 큰 값이 얻어짐을 알 수 있고, z = –0.2(Fig. 4(c))에서조차 H_z가 기존의 드라이브 라인의 옆면 중앙 (Fig. 3(a))의 것보다 크게 나타났다.

Fig. 5(a)에 기존의 X-Y 드라이브 라인에 각각 150 mA, 50 mA의 전류를 흘렸을 때 z = 0.1 평면에서, Fig. 5(b)에 본 연구의 X-Y 드라이브 라인에 각각 50 mA, 30 mA의 전류를 흘렸을 때 z = 0 평면에서의 수직 자기장 H_z의 지도를 나타내었다. 그림에서 검게 보이는 부분이 핵생성이 이루어지는 곳으로 본 연구의 드라이브 라인은 기존의 것보다 약 3배 작은 전류로도 동일한 H_z가 얻어짐을 알 수 있다. 또한, 기존의 드라이브 라인은 극성이 서로 다른 수직 자기장(+H_z, –H_z)이 인접한 두 위치에서 얻어지나, 본 연구의 드라이브 라인은 하나의 극성을 갖는 강한 수직 자기장이 한 위치(X, Y 드라이브 라인의 만입이



(a) (b)

Fig. 5. Maps of Perpendicular magnetic field H_z for (a)Conventional drive lines (b)New drive lines.

교차하는 위치(Fig. 5(b), Fig. 7))에서만 얻어진다는 특징을 가지고 있다.

IV. 연자성 박막에 의한 드라이브 라인의 증대 효과 시뮬레이션

Fig. 5(a)의 A-A'직선에서의 수직 자기장 H_z를 Fig. 6에 나타냈다. Fig. 6은 각 X, Y 드라이브 라인의 H_z의 합으로 X-Y드라이브 라인의 H_z가 얻어지고, 극성이 서로 다른 H_z가 얻어짐을 보여준다.

Fig. 5(b)의 A-A'직선에서의 수직 자기장 H_z를 Fig. 7에 나타내었다. 본 연구의 드라이브 라인에서 연자성층이 없을 때의 H_z는 약 -317 Oe 정도이고, 연자성층이 있을 때의 H_z는 -386 Oe 정도를 나타냈다. 이는 연자성층에 의해 수직 자기장 H_z가 약 70 Oe 증대되는 효과가 있음을 보여준다. 그리고 그림에서는 나타내지 않았으나 연자성층에 의해 X 드라이브 라인는 약 50 Oe, Y 드라이브 라인은 약 20 Oe의 증대 효과를 보였다. X 드라이브 라인의 전류는 Y 드라이브 라인보다 3~4배 정도 큰 것이 구동상 유리한데[1,4] 본 연구의 드라이브 라인에서는 연자성층과 가까운 X 드라이브 라인에 보다 강한 H_z 증대 효과가 있음으로 X 드라이브 라인의 전류를 감소시키는 것도 가능하다.

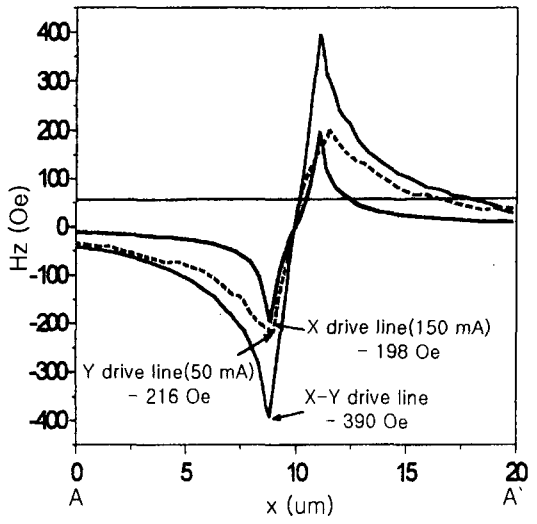


Fig. 6. Perpendicular magnetic field H_z across the line A-A' in Fig. 5(a).

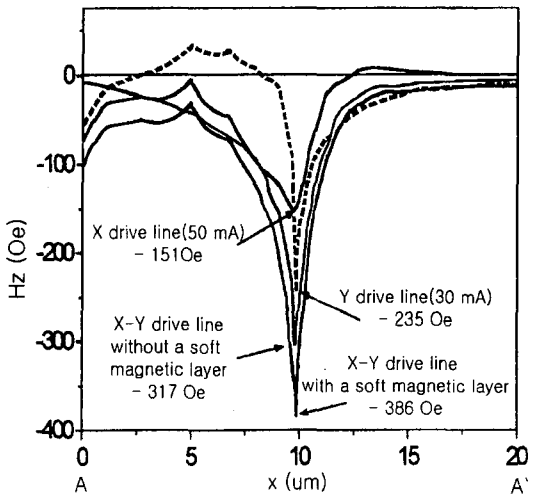


Fig. 7. Perpendicular magnetic field H_z across the line A-A' in Fig. 5(b).

V. 광 효율, 구동 전압 및 제조 공정

본 연구의 드라이브 라인은 반사막의 역할도 겸하므로, 반사 효율을 크게 하기 위해 Y 드라이브 라인이 가능한한 화소 표면의 넓은 면적을 덮고, Y 드라이브 라인에 의해서 덮혀지지 않은 영역도 그 대부분을 X 드라이브 라인에 의해 덮도록 설계하였다.

R-MOSLM의 광효율 E는 반사막 역할을 하는 X-Y 드라이브 라인이 화소를 덥는 면적과 화소 사이의 간격에 의해 영향을 받고, E=FDRTP로 나타낼 수 있다.

여기서 F : pixel fill factor=$\{(p-g-h\sqrt{2})/p\}^2$,

D : zero-order diffraction factor=$\{(p-g-h\sqrt{2})/p\}^2$

R : conductor reflectivity (4% Cu가 포함된 Al)=0.75

T : transmission factor = $e^{2\alpha d}$

P : polarization factor = $\sin^2(4\theta_F d)$로 표현된다.

위의 식에서 사용되는 변수들은 R-MOSLM의 형상과 가네트 박막의 물성에 의해 결정된다. 먼저 R-MOSLM의 형상에 의한 영향으로 위 식의 p는 화소 pitch(반복주기), g는 화소간 갭, h는 X-Y 드라이브 라인에 의해 덥혀지지 않는 화소 표면의 면적을 구하기 위해 기존의 R-MOSLM의 경우 X-Y 드라이브 라인 사이의 간격을 나타낸다. 다음으로 가네트 박막의 물성에 의한 영향으로, α는 가네트 박막의 흡광계수, θ_F는 가네트 박막의 페러데이 회전각, d는 가네트 박막의 두께를 나타낸다.

기존의 R-MOSLM의 경우 p = 24 μm, g = 2 μm, h = 1.6 μm, α = 0.06/μm(파장650 nm에서), θ_F = 1.2°/μm (파장 650 nm에서), d = 3 μm이다. 이 값들을 사용하여 기존의 R-MOSLM에서 광효율은 계산하면 약 1.08% 얻어진다. 본 연구의 드라이브 라인에서는 X-Y 드라이브 라인이 화소 전체를 덮고 있으므로 h를 '0'으로 볼 수 있다. 기존의 R-MOSLM과 동일한 p, g, α, θ_F, d를 사용하고, h = 0으로 가정하고 본 연구의 R-MOSLM의 광효율을 계산하면

E = FDRTP
= (0.84)(0.84)(0.75)(0.70)(0.06)
≒2.22%

따라서 본 연구의 R-MOSLM이 기존의 R-MOSLM에 비해 광효율이 약 2배 큼을 알 수 있다.

소비전력은 128×128의 화소 어레이를 기준으로 생각하면, 기존의 X 드라이브 라인의 소비전력은 I = 150 mA, V = 7.14 V일 때 P = 1.07 W이고, Y 드라이브 라인의 소비전력은 I = 50 mA, V = 4.38 V일 때 P = 0.219 W이므로 X-Y 드라이브 라인의 전체 소비전력 P = 1.29 W가 된다. 본 연구의 X 드라이브 라인의 소비전력은 I = 50 mA, V = 6.27 V일 때 P = 0.313 W이고, Y 드라이브 라인의 소비전력은 I = 30 mA, V = 4.14 V일 때 P = 0.124 W이므로 X-Y 드라이브 라인의 소비전력 P = 0.437 W가 얻어진다. 따라서 기존의 것에 비하여 소비전력이 3배 작음을 알 수 있다.

기존의 R-MOSLM의 제조 공정은 총 64공정으로 이루어져 있는데, 이 중 X-Y 드라이브 라인의 제작이 37공정을 차지하고 있다. 화소 중앙에 홈을 파고, 채널을 만들어 X 드라이브 라인을 묻는 공정(16 공정)과, 그 위로 절연막을 적층시키는 공정(15 공정) 등 고난도 공정으로 이루어져 있다. 본 연구의 R-MOSLM은 드라이브 라인을 묻지 않으므로 X-Y 드라이브 라인 공정을 15공정으로 축소할 수 있고, 또한, 절연막을 식각하지 않고 절연막이 화소 전체만 덮으므로(Fig. 2) 제조가 용이하다. X-Y 드라이브 라인의 alignment tolerance는 약 0.1 um~0.6 um이다. 즉, X-Y 드라이브 라인의 만입들이 0.1um~0.6 um 겹치게 align하면 된다.

VI. 결 론

자기 광학 공간 광 변조기의 화소의 자화를 반전시키기 위하여 사용하는 드라이브 라인의 형상을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 설계하고, 연자성막을 도입함으로써 화소 반전에 필요한 최소 전류와 소비 전력를 기존의 드라이브 라인에 비하여 약 3배 감소시킬 수 있었으며, 드라이브 라인을 묻지 않고, 화소를 덮는 반사막(드라이브 라인)의 면적을 크게 하여 광효율을 2.2배 증가시키고, 제조공정을 대폭 단순화시킬 수 있는 드라이브 라인의 형상을 제시했다.

참 고 문 헌

[1] J. P. Karins, J. Lucas and T. Maki, SPIE Proceeding., **2490**, 416(1995).

[2] James P. Karins, Sauart A. Mills, James R. Ryan, R. Barry Dydyk and J.Lucas, SPIE Proceeding., **3073**, 128(1997).

[3] David T. Carrot, Gary Mallaley, SPIE Proceeding, Vol. 3386 (1998).

[4] J. Cho, S. Santhsnam, T. Lee, K. Mountfield, and J. Lucas, J. Appl. Phys., **76**(3), 1910(1994).

한국자기학회지 Volume 10, Number 2, April 2000

Design of Drive Line Shape for Reflective Magneto-Optic Spatial Light Modulator with High Switching Sensitivity by Computer Simulation

Jaehyuk Park and Jaekyong Cho

Department of Electronic Materials Engineering,Gyeongsang National University, 900 Gazwa, Chinju, Gyeongnam 660-701, Korea

(Received 22 December 2000, in final form 10 March 2000)

Drive line shape for reflective magneto-optic spatial light modulator has been designed by computer simulation. A factor of 3 improvement in pixel switching sensitivity and power consumption, compared to the conventional reflective magneto-optic spatial light modulator, has been achieved by the use of wedge-shape drive line and a soft magnetic layer. A factor of 2 higher optical efficiency and a factor of 2 simpler fabrication process have been achieved by the use of drive lines that covers most of the surface of pixel and unpatterned insulator.